

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2017

Václav Bajgar

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství

Bez-bateriový koncept napájení zařízení
s kinetickým měničem energie
Batteryless Concept of Device Power Supply using
Kinetic Energy Harvester

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Václav Bajgar**
Studijní program: N2649 Elektrotechnika
Studijní obor: 3901T009 Biomedicínské inženýrství
Téma: **Bez-bateriový koncept napájení zařízení s kinetickým měničem energie**
Batteryless Concept of Device Power Supply using Kinetic Energy
Harvester

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Přehled technologií, které získávají energii z prostředí a zhodnocení vhodnosti.
2. Řešení technologií energetických měničů pracujících na základě přeměny kinetické energie.
3. Přehled metod a strategií pro implementaci low-power na úrovni vestavěných systémů.
4. Koncepty funkčnosti bez-bateriových monitorovacích systémů.
5. Návrh vlastního řešení s pomocí vývojových kitů.
6. Testování vlastního řešení (získaná energie, spolehlivost a výkon)
7. Zhodnocení dosažených výsledků závěr práce.

Seznam doporučené odborné literatury:

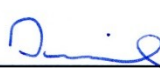
- [1] PRIYA, Shashank. a D. J. INMAN. *Energy harvesting technologies*. New York: Springer, c2009. ISBN 9780387764641.
[2] ERTURK, Alper a D. J. INMAN. *Piezoelectric energy harvesting*. Chichester: Wiley, 2011.
[3] RABAEY, Jan. *Low power design essentials*. Online-Ausg. New York: Springer, 2009. ISBN 9780387717135.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **Ing. Michal Prauzek, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2016

Datum odevzdání: 28.04.2017


doc. Ing. Jiří Koziolek, Ph.D.
vedoucí katedry




prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne 20.6.2017

.....Bajgar.....

Podpis studenta

Poděkování

Chtěl bych poděkovat vedoucímu práce panu Ing. Michalu Prauzkovi, Ph.D. za metodickou pomoc, ochotu a především projevenou důvěru v nejtěžších chvílích.

Dále bych chtěl poděkovat Ing. Martinu Stankušovi, Ph.D. za cenné rady a odbornou pomoc při vypracování mé práce.

V neposlední řadě bych chtěl poděkovat své rodině a nejbližším za velkou podporu během tvorby této práce.

Abstrakt

Cílem této práce je návrh funkčního bez-bateriového konceptu napájení zařízení pomocí kinetického měniče. Zvoleným měničem je jednovrstvý piezoelektrický měnič v podobě vetknutého nosníku. Teoretická část obsahuje popis technologií získávající energii z prostředí, přehled metod a strategií pro dosažení nízké spotřeby elektronických zařízení (low-power) a přehled konceptů funkčnosti bez-bateriových systémů. Práce zahrnuje i přiloženou řešeršní práci konkrétních použití kinetických měničů energie. V praktické části je pomocí vývojových kitů navrhnut vlastní, hybridní bez-bateriový koncept napájení vývojové platformy FRDM KL25Z, jejíž mikrokontrolér vykonává sadu programových instrukcí pro simulaci jakéhokoliv jiného low-power zařízení. Koncept je otestován a vyhodnocen z hlediska získané energie, spotřebované energie platformou, ztracené energie, spolehlivosti a účinnosti.

Klíčová slova

Získávání energie z prostředí, kinetický měnič energie, piezoelektrický měnič, low power technologie, vestavěné systémy

Abstract

The aim of this master thesis is to design a functional battery-less concept of device power supply while using kinetic energy transducer. The kinetic energy transducer selected for this thesis is a unimorph piezoelectric transducer in a form of cantilever beam. The theoretical part describes energy harvesting methods, low-power design strategies, and topologies of energy harvesting systems. The thesis includes attached research regarding kinetic energy harvesting applications. The practical part deals with the design of a concept of an autonomous hybrid harvesting system while using development kits. This harvesting system is used to power a development platform FRDM KL25Z with a microcontroller performing a set of program instructions in order to simulate power consumption of any other low-power device. The proposed concept is evaluated in terms of harvested energy, power consumption, dissipated energy, reliability and efficiency.

Keywords

Energy harvesting, kinetic energy harvester, piezoelectric transducer, low power design, embedded systems

Obsah

Seznam použitých symbolů, pojmů a zkratk	8
Seznam ilustrací, tabulek a grafů.....	9
1 Úvod.....	11
2 Technologie získávající energii z prostředí	13
2.1 Termo-energie	14
2.2 Elektromagnetické záření.....	14
2.2.1 Solární energie	14
2.2.2 RF záření	15
2.3 Kinetická energie.....	15
2.3.1 Kinetické měniče pracující na principu elektromagnetické přeměny	16
2.3.2 Piezoelektrické kinetické měniče.....	17
2.3.3 Kinetické měniče pracující na principu elektrostatické indukce.....	20
2.3.4 Energetické zisky a limity kinetických měničů	21
3 Metody a strategie pro implementaci low-power.....	23
3.1 Pokrok výpočetních technologií	23
3.2 Low-power techniky	24
3.2.1 Techniky na úrovni hardwaru.....	25
3.2.2 Techniky pro napájecí systém	26
3.2.3 Techniky pro výpočetní systém (mikrokontrolér)	26
3.2.4 Techniky pro řízení periferií systému	29
4 Koncepty funkčnosti bez-bateriových systémů	30
4.1 Přímý bez-bateriový model	30
4.2 Hybridní systém s energetickým úložištěm	31
4.3 Systém s primární baterií	34
5 Návrh vlastního řešení pomocí vývojových kitů.....	36
5.1 Kinetický měnič	37
5.1.1 Piezoelektrický měnič PPA 1011.....	38
5.2 Zdroj kinetické energie	40
5.3 Harvester energie.....	42
5.3.1 LTC3588	43
5.4 Vývojová platforma FRDM KL25Z.....	44
5.4.1 Hardwarové úpravy platformy FRDM KL25Z.....	46

5.4.2	Softwarové nastavení mikrokontroléru KL25	48
5.4.3	Implementace programu	51
6	Testování návrhu	52
6.1	Postup měření	53
6.2	Získaná energie	53
6.3	Spotřeba proudu, výkon, energie a účinnost návrhu	56
6.3.1	Výsledky při výstupním napětí harvesteru 3,3 V	58
6.3.2	Výsledky při výstupním napětí harvesteru 1,8 V	61
6.4	Statistická analýza výsledků	64
6.4.1	Doba chodu	64
6.4.2	Spotřebovaná energie	66
6.4.3	Ztracená energie	68
6.4.4	Účinnost	70
6.5	Shrnutí a zhodnocení naměřených výsledků	72
7	Závěr	74
	Literatura	76
	Seznam příloh	78

Seznam použitých symbolů, pojmů a zkratek

RF	Rádiová frekvence
MPPT	Optimalizace pracovního bodu
DC	Stejnoseměrný proud
FRAM	Feroelektrická non-volatilní paměť s přímým přístupem
EEPROM	Elektronicky vymazatelná paměť pouze pro čtení
DVS	Dynamická změna napájecího napětí
DFS	Dynamická změna frekvence mikrokontroléru
CMOS	Doplňující se kov-oxid-polovodič
SRAM	Statická paměť s přímým přístupem
PZT-5H	Typ piezoelektrického materiálu
MCU	Mikrokontrolér
RPM	Počet otáček za minutu
LPTMR	Low-power časovač
TSI	Kapacitní dotykový snímač
VLPR	Low-power režim mikrokontroléru při vykonávání instrukcí
VLPS	Úsporný stop mód mikrokontroléru
Energy harvesting	Technologie získávání energie z prostředí
Harvester	Neboli Energy harvester (v textu počestěno na harvester energie), elektronický obvod, který se stará o usměrnění, uložení a regulaci získané energie z prostředí
Low-power	Technologie nízké energetické spotřeby
Integer	Základní datový typ – celé číslo
Flag	Vlajka (indikace)
Peak to Peak Displacement	Vychýlení (rozkmit) špička-špička
Clamp	Upnutí, ukotvení
Kit	Sada
Unimorph	Jednovrstvý piezoelektrický měnič
Bimorph	Dvouvrstvý piezoelektrický měnič
Cache	Mezipaměť
Header	Konektor

Seznam ilustrací, tabulek a grafů

Obrázek 1 Solární panel [8].....	15
Obrázek 2 RFID karta [9].....	15
Obrázek 3 Jednoduchý koncept elektromagnetického měniče [11].....	17
Obrázek 4 a) 33 konfigurace piezoelektrického měniče b) 31 konfigurace piezoelektrického měniče [10].....	18
Obrázek 5 Piezoelektrický měnič s dvěma vrstvami piezoelektrického materiálu a) v sérii b) paralelně[10].....	19
Obrázek 6 Nosníková struktura piezoelektrického měniče; tip mass m – závaží na hrotu měniče, piezo layer – vrstva piezoelektrického materiálu[10]	19
Obrázek 7 Princip elektrostatické konverze energie [6]	21
Obrázek 8 Vývoj počtu tranzistorů na čipu a frekvence hodinového signálu mikroprocesorů v důsledku Mooreova zákona[14].....	24
Obrázek 9 Nezřetězené zpracování vs pipelining[15].....	27
Obrázek 10 Paralelismus u posuvných registrů[15].....	27
Obrázek 11 Metoda adaptivního spínání pro výpočetní systém [5].....	28
Obrázek 12 Topologie napájecího systému – přímý bez-bateriový model[7]	30
Obrázek 13 Topologie napájecího systému – hybridní systém s energetickým úložištěm[7]	32
Obrázek 14 Topologie napájecího systému – systém s primární baterií [7].....	34
Obrázek 15 Blokové schéma navrhnutého konceptu	36
Obrázek 16 Výkonové hustoty technologií získávající energii z prostředí a bateriových zdrojů v závislosti na napětí [3].....	37
Obrázek 17 Piezoelektrický měnič PPA-1011 [20]	38
Obrázek 18 Ukotvený a naladěný měnič PPA-1011	39
Obrázek 19 Vlastní frekvence piezoměniče PPA-1011	39
Obrázek 20 Elektromotor SGM20F-180SHV-62.5-R	40
Obrázek 21 Zjednodušené 3D vyobrazení pravidelných ohybů piezoměniče.....	41
Obrázek 22 Průběh generovaného střídavého napětí v důsledku pravidelného ohybu piezoměniče.....	42
Obrázek 23 Deska Energy Harvester Breakout - LTC3588 [24].....	42
Obrázek 24 Elektrické schéma desky Energy Harvester Breakout - LTC3588, převzato a upraveno z [24].....	43
Obrázek 25 Blokový diagram LTC3588 [23].....	44
Obrázek 26 Vývojová platforma FRDM KL25Z [26]	45
Obrázek 27 Hardwarové úpravy platformy pro měření proudového odběru [27]	46
Obrázek 28 Akcelerometr MMA8451Q na cestě P_{3v3} [27]	47
Obrázek 29 Přerušení cesty pod J20	47
Obrázek 30 Resetovací signál OpenSDA J14 [27]	48
Obrázek 31 Stavový automat mikrokontroléru.....	50
Obrázek 32 Blokové schéma měřícího řetězce.....	52

Tabulka 1 Základní rozdělení technologií získávající energii z prostředí [6]	13
Tabulka 2 Příklady low-power technik na různých úrovních[7]	24
Tabulka 3 Příklady low-power technik pro výpočetní systém[5] [7].....	26
Tabulka 4 Parametry elektromotoru SGM20F-180SHV-62.5-R.....	40
Tabulka 5 Proudové odběry na začátku úprav	46
Tabulka 6 Proudové odběry po přerušení J20 a odstranění akcelerometru	48
Tabulka 7 Proudové odběry po všech hardwarových úpravách	48
Tabulka 8 Výchozí proudové odběry po veškerých hardwarových a softwarových úpravách	50
Tabulka 9 Naměřené a vypočtené hodnoty pro měření při výstupním napětí harvesteru 3,3 V.....	58
Tabulka 10 Naměřené a vypočtené hodnoty pro měření při výstupním napětí harvesteru 1,8 V.....	61
Tabulka 11 Shapiro – Wilkův test normality dat doby chodu	65
Tabulka 12 Shapiro – Wilkův test normality dat spotřebované energie	66
Tabulka 13 Shapiro – Wilkův test normality dat ztracené energie	68
Tabulka 14 Shapiro – Wilkův test normality dat účinnosti	70
Tabulka 15 Porovnání bodových odhadů středních hodnot zpracovaných parametrů pro obě výstupní napětí harvesteru.....	72
Graf 1 Typický průběh nabíjení energetického úložiště při výstupním napětí harvesteru 3,3 V.....	54
Graf 2 Typický průběh nabíjení energetického úložiště při výstupním napětí harvesteru 1,8 V.....	55
Graf 3 Přiblížení průběhu nabíjení úložiště při výstupním napětí 3,3 V	55
Graf 4 Příklad průběhů napětí a proudu pro výstupní napětí 3,3 V	59
Graf 5 Příklad průběhů okamžitého výkonu a energie pro výstupní napětí 3,3 V	59
Graf 6 Příklad průběhů napětí a proudu pro výstupní napětí 3,3 V při kontinuálním dodávání kinetické energie piezoměniči	60
Graf 7 Příklad průběhů okamžitého výkonu a energie pro výstupní napětí 3,3 V při kontinuálním dodávání kinetické energie piezoměniči	60
Graf 8 Příklad průběhů napětí a proudu pro výstupní napětí 1,8 V	62
Graf 9 Příklad průběhů okamžitého výkonu a energie pro výstupní napětí 1,8 V	62
Graf 10 Příklad průběhů napětí a proudu pro výstupní napětí 1,8 V při kontinuálním dodávání kinetické energie piezoměniči	63
Graf 11 Příklad průběhů okamžitého výkonu a energie pro výstupní napětí 1,8 V při kontinuálním dodávání kinetické energie piezoměniči	63
Graf 12 Vícenásobný krabicový graf analýzy doby chodu	64
Graf 13 Vícenásobný krabicový graf analýzy spotřebované energie.....	66
Graf 14 Vícenásobný krabicový graf analýzy ztracené energie	68
Graf 15 Vícenásobný krabicový graf analýzy účinnosti	70

1 Úvod

Růst světové populace společně s rozvojem technologií představují značnou zátěž na zdroje, které je nám schopna naše planeta poskytnout, a které jsme díky ní schopni sami vyprodukovat. Experti už dlouhou dobu varují před možnou vyčerpatelností a konečností zdrojů, ať už se jedná o vodu, jídlo či neobnovitelné energetické zdroje. Proto se pomalu ale jistě ubírá pozornost lidstva k energetickým obnovitelným zdrojům. [1]

Obrovský technologický pokrok posledních desítek let způsobil nárůst počtu všemožných technologických vymožeností, zejména pak elektronických a mikroelektronických zařízení, které lidstvo běžně používá v každodenním životě. Jedná se zejména o různá přenosná a nositelná elektronická zařízení či bezdrátové senzory atp., ale i o specializované biomedicínské autonomní přístroje (ať už přenosné, nositelné či implantabilní), které se objevily v důsledku rychlého technologického rozvoje zdravotnické techniky. [6] [1]

Tato elektronická zařízení jsou dnes téměř výhradně napájena pomocí baterií, které však mají několik nevýhod. Hlavní nevýhodou je omezená životnost baterií, přičemž je nutná jejich periodická výměna či dobítí. Navíc často narážíme na limity z hlediska rozměrů, a proto vzniká jakýsi kompromis mezi kapacitou baterie a velikostí zařízení, který přímo ovlivňuje životnost, dimenze a celkovou funkčnost bateriově napájených přístrojů. Další nevýhodou baterií je jejich zátěž na životní prostředí. Miliony baterií jsou shromažďovány na speciálních skládkách, přičemž těžké kovy mohou způsobit kontaminaci podzemní vody. [6] [1]

Zmiňovaný technologický pokrok šel v ruku v ruce s trendem zmenšování velikosti a zvětšování funkčnosti elektronických zařízení. Rozšiřováním funkcí elektronických zařízení často došlo k zvětšení jejich energetických požadavků. Na druhou stranu se drasticky snížila velikost elektrického obvodu a s ní i energie potřebná k vykonání jedné (binární) operace, což přímo souvisí s Mooreovým zákonem. [6]

Jednou z možností, jak překonat limity baterií jsou technologie získávající energii z prostředí, s jejichž pomocí můžeme buď baterie dobít či přímo napájet zařízení. Tyto technologie se v poslední době staly relevantními díky rapidnímu zlepšení low-power strategií, kdy v důsledku došlo ke značnému snížení energetické spotřeby elektronických zařízení.[6] [1]

Technologie získávající energii z prostředí převádí např. kinetickou, solární, RF či termální energii na energii elektrickou. Tyto energie z prostředí však nejsou zcela spolehlivé pro svůj nestálý a nekontinuální charakter. Pro reálné využití těchto technologií k napájení zařízení je potřeba navrhnout koncept takového systému, který bude umět efektivně energii z prostředí nejen konvertovat na elektrickou (pomocí měniče), ale následně i usměrnit, uložit a regulovat. [6][7]

Práce je proto zaměřena na teoretický popis technologií získávající energii z prostředí (se zaměřením na energii kinetickou), strategií pro snížení energetické spotřeby (low-power) a konceptů napájení bez-bateriových systémů. Součástí práce je i rešerše aplikací kinetických měničů. V praktické části je navrhnout a realizován vlastní koncept bez-bateriového napájení zařízení pomocí kinetického

měníče. Napájené zařízení má v této práci podobu vývojové platformy FRDM KL25Z se sadou naprogramovaných užitečných instrukcí. Tento koncept je pak vyhodnocen z hlediska získané energie, spotřebované energie platformou, ztracené energie, doby chodu platformy, spolehlivosti a účinnosti.

2 Technologie získávající energii z prostředí

V minulosti, dávno před vynalezením spalovacího motoru, elektrického vedení či baterií, lidé paradoxně využívali technologie získávající energii z prostředí jako jejich hlavní zdroj. Příkladem budiž větrné mlýny či vodní kola, které se postupně vyvinuly v dnešní větrné či vodní elektrárny. Ve 40. letech minulého století se používaly elektrické generátory na ruční startování v rádiích a svítilnách. Dodnes se používá například u bicyklů dynamo, které je schopno elektromagneticky vygenerovat výkon až 3 W. [1]

Dnes existují dvě základní rozdělení technologií získávající energii z prostředí (Tabulka 1). V první řadě rozdělujeme tyto technologie podle toho, kdo nebo co je zdrojem energie, kterou převádíme na energii elektrickou. Tímto zdrojem může být buď člověk, nebo jeho okolí – životní prostředí. Druhým typem je rozdělení technologií podle druhu energie, která je konvertována. Nejzákladnějšími druhy energií v prostředí jsou kinetická, termální a elektromagnetické záření. [2][6]

Tabulka 1 Základní rozdělení technologií získávající energii z prostředí [6]

Zdroj energie	Druh energie
Člověk (lidské tělo)	Kinetická, Termo-energie
Životní prostředí	Kinetická, Termo-energie, Elektromagnetické záření

Pro zařízení, jejichž zdrojem energie z prostředí je člověk, je k dispozici pouze energie kinetická a termo-energie. V tomto případě lze kinetickou energii rozdělit na aktivní a pasivní, podle toho, zda jsou pohyby lidského těla specificky určeny pro získávání energie, nebo jsou jen výsledkem spontánní tělesné aktivity. Z tohoto hlediska lze konstatovat, že termo-energie je vždy pasivní. [2][6]

Jako příklad aktivní kinetické energie člověka je možné uvést točení klikou nebo roztřesení nějaké věci, přičemž obojí může sloužit k nabití elektronického zařízení. Pasivní kinetická energie je však daleko zajímavější a atraktivnější, jelikož svou kontinuitou eliminuje problém udržování energie u přenosných a nositelných elektronických zařízení. [6]

Nejznámějším příkladem komerčního využití kinetické energie lidského těla jsou náramkové hodinky, které se vyvinuly z čistě mechanického natahovacího konceptu v hybridní, kde využíváme malý elektromagnetický generátor k dobíjení baterie. V klidových podmínkách je tak výstupní výkon až 5 μ W, při intenzivním třesení ruky až 1 mW. Hodinky taktéž mohou využívat i termo-energií lidského těla, kdy lze při teplotním rozdílu 1–3°C vygenerovat výkon až 1,5 μ W. [6][1]

Zdroje energie pro zařízení získávající energii z životního prostředí zahrnují kinetickou energii, elektromagnetické záření a termo-energií. Tato zařízení tedy mohou např. získávat energii z vibrací, pokud jsou umístěny na strojích, motorech, budovách nebo jiných místech blízko zdroje vibrací. Mezi druhy elektromagnetického záření patří např. velmi známé solární záření, nebo také RF záření, a to z přírodních či umělých zdrojů. Termo-energie z životního prostředí je podobně jako

u člověka závislá na existenci teplotního gradientu, tedy rozdílu teploty. Dalšími zdroji energie z životního prostředí může být např. proudění vzduchu, či akustický hluk.[6][7]

2.1 Termo-energie

Zdrojem termální neboli termo-energie může být člověk, zvíře, stroj nebo jiné objekty v životním prostředí. Termoelektrický generátor se v podstatě skládá z termočlánu. Ten obsahuje polovodiče typu P a N zapojené z teplotního hlediska paralelně a z elektrického hlediska sériově. Na základě Seebeckova (termoelektrického) jevu dochází přeměnou teplotního rozdílu ke vzniku elektrického napětí. Rozdíl teplot dvou teplotných bodů tak v důsledku produkuje elektrický proud, který je schopen napájet zátěž připojenou do série k termoelektrickému generátoru.[6]

Obecně lze říci, že horní limit získatelné energie termoelektrického generátoru je dán účinností Carnotova cyklu. Např. při teplotním rozdílu mezi běžnou pokojovou teplotou (20°C) a teplotou lidského těla (37°C) je tato účinnost zhruba 5,5 %. Pokud by byly započítány teplotní ztráty v důsledku vypařování, a předpokládali bychom, že veškeré vyzářené teplo člověkem je převedeno na elektrickou energii, tak maximální získatelný výkon by byl 2,8 - 4,8 W. [6]

2.2 Elektromagnetické záření

Dalším druhem energie v životním prostředí je elektromagnetické záření, přítomné jednak v podobě světelného záření (známé jako solární záření) nebo RF záření s nižší frekvencí. Obě tyto metody jsou dnes často používány.

2.2.1 Solární energie

Získávání a zpracování elektrické energie ze solární energie Slunce je dnes již technologicky pokročilé a uplatňuje se ve velkém měřítku. Fotovoltaické systémy tak mohou produkovat elektrickou energii v řádu mW až MW pro širokou škálu aplikací od náramkových hodinek, přes kalkulačky až po velké ostrovní fotovoltaické systémy. Vedle klasického, vnějšího solárního záření existuje i tzv. vnitřní solární záření.[6][7]

Množství slunečního záření se na Zemi liší v důsledku rozdílné zeměpisné šířky a délky. Například v Nizozemsku je průměrný roční úhrn slunečního záření 992 kWh/m^2 , v Tanzanii dokonce 2026 kWh/m^2 . Pro jakékoliv však místo existuje ideální úhel naklonění solárního panelu tak, aby bylo získáváno co největší množství energie z přímo dopadajících paprsků. V případě vnitřního solárního záření, kdy je solární panel umístěn uvnitř budovy, je roční úhrn energie značně menší.[6][7]

V současnosti je většina solárních panelů (Obrázek 1) vyrobena z polovodičů (např. krystalického či amorfního křemíku). Účinnost konverze energie solárního panelu je definována jako poměr mezi výstupním výkonem panelu a vstupním výkonem solárního záření. Solární panel o ploše 100 cm^2 a účinnosti 10 % tak dokáže při sluneční intenzitě 1000 W/m^2 generovat výkon až 1 W. [6]



Obrázek 1 Solární panel [8]

2.2.2 RF záření

Záření na frekvenci rádiových vln se používá k napájení identifikačních karet (Obrázek 2). Využívá se usměrnění vysokoenergetického elektromagnetického záření z blízkého zdroje do zařízení, čímž je možno přesouvat nejen energii, ale i informace.[6]



Obrázek 2 RFID karta [9]

V městech a hustě obydlených oblastech se nachází mnoho potenciálních zdrojů RF záření: rádiové vysílání, mobilní telefony, bezdrátové sítě atp. Cílem je zachycení této energie a její přeměna na užitečnou (elektrickou) energii. Přeměna RF záření probíhá pomocí usměrňovací antény (antény s usměrňovačem), která obsahuje Schottkyho diodu umístěnou mezi póly antény. Energetická úroveň dostupného RF záření je však tak nízká, že ji v současnosti nedokáže využít téměř žádné zařízení.[6]

2.3 Kinetická energie

V této kapitole jsou shrnuty technologie energetických měničů pracujících na základě přeměny kinetické energie a také jejich energetické limity z hlediska získané energie. V příloze (Příloha I) na CD je obsáhlá rešerše jednotlivých použití těchto měničů pro získávání energie a porovnání výhod jednotlivých technologií.

Kinetická energie nejsnadněji dostupným zdrojem energie pro zařízení získávající energii lidského těla i životního prostředí. Získávání elektrické energie z kinetické energie funguje na principu zpracování a přeměny externích vibrací, nějaké formy pohybu či mechanické deformace. Externí vibrace mohou mít konstantní frekvenci (vibrace z motoru či jiné strojové vibrace) nebo proměnlivou frekvenci. Pohyb může být vyvolán aktivitami člověka, přírodním prostředím okolo nás nebo oscilacemi s nízkou frekvencí, vysokou amplitudou a širokým frekvenčním spektrem. Kinetické měniče tedy využívají tyto vibrace, dislokaci pohyblivé části či mechanickou deformaci k produkci elektrické energie. [1] [6]

Kinetické měniče jsou navrhovány tak, aby jejich vlastní rezonanční frekvence byla stejná jako rezonanční frekvence systému, který je zdrojem vibrací či pohybu, a to proto, aby byla vygenerovaná energie co největší. Existují tři základní principy přeměny kinetické energie na energii elektrickou, které tyto měniče používají, a podle těchto principů je rozdělujeme na: [1] [6]

- Elektromagnetické měniče
- Piezoelektrické měniče
- Elektrostatické měniče

Z hlediska mechanické konstrukce pak existují dva základní druhy kinetických měničů [6]:

- Inerciální měniče
- Neinerciální měniče

Inerciální měniče reagují na kinetickou energii rozvibrováním nebo uvedením své vlastní hmoty do pohybu. Získaná energie je tedy závislá na této hmotě, přesněji řečeno na vlastním pohybu měniče. Z hlediska principů přeměněny mohou být tyto měniče elektromagnetické, elektrostatické i piezoelektrické. U piezoelektrických inerciálních měničů způsobuje vychýlení hmoty piezoměniče v důsledku dodání kinetické energie nárazem či vibracemi deformaci piezoelektrického materiálu. [6]

Neinerciální měniče využívají přímý tlak, který je přeměněn na elastickou energii. Ta deformuje piezoelektrický materiál měniče, čímž je generována elektrická energie. V tomto případě závisí získaná energie na velikosti deformace, prostorových rozměrech a mechanických vlastnostech jako např. Youngově modulu. [6]

2.3.1 Kinetické měniče pracující na principu elektromagnetické přeměny

Elektromagnetické měniče fungují na principu vzniku indukovaného napětí v cívce při pohybu magnetu vzhledem k této cívce. Napětí v cívce je tedy podle Faradayova zákona indukováno změnou magnetického toku v čase: [1]

$$|E| = |d\Phi_B/dt| \quad (2.1)$$

Kde:

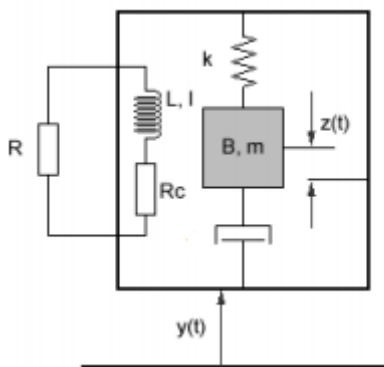
E ...elektromotorická energie [J]

Φ ... magnetický tok [Wb]

t ...čas [s]

Změna magnetického toku je tedy způsobena buď pohybujícím se magnetem a statickou cívkou, nebo naopak pohybující se cívkou a statickým magnetem. Velikost elektromotorické energie je závislá na počtu závitů cívky, síle magnetického toku a velikosti změny magnetického toku. Typické uspořádání elektromagnetického měniče může být buď v podobě magnetu připevněného na vetknutém nosníku, či pružina, která osciluje vzhledem k cívce, nebo volný magnet, který zajíždí do spirálovité cívky, jež jej obklopuje. [1]

Na obrázku níže (Obrázek 3) lze vidět jednoduchý koncept elektromagnetického měniče. V tomto generátoru se magnetické závaží m na pružině s tuhostí k nachází vedle obvodu s cívkou L . V momentě, kdy se generátor rozpohybuje a závaží začne oscilovat, dojde ke změně pozice magnetu $z(t)$, což vyvolá změnu magnetického pole B . V důsledku magnetické indukce tak vzniká elektrická energie.[6] [11]



Obrázek 3 Jednoduchý koncept elektromagnetického měniče [11]

2.3.2 Piezoelektrické kinetické měniče

Piezoelektrické měniče jsou založeny na přímém piezoelektrickém jevu. Pokud je piezoelektrický materiál (nejčastěji krystal) vystaven mechanické deformaci, dojde ke vzniku elektrického napětí na tomto materiálu díky změnám v mřížce. Velikost napětí závisí na velikosti deformace, typu piezoelektrického materiálu a směru deformační síly.[1]

Piezoelektrický měnič, nejčastěji v podobě vetknutého nosníku může být vystaven mechanické tlakové deformaci nebo externím vibracím. Nosník má vibrační strukturu a dynamické namáhání indukované v piezoelektrických vrstvách po aplikaci deformační či vibrační energie z prostředí má na svědomí vznik elektrického napětí na elektrodách. Podobně jako u jiných typů měničů jsou i piezoměniče navrhovány tak, aby jejich pracovní frekvence odpovídala frekvenci zdroje vibrací, ze kterého energii přeměňují. Toto napětí je střídavé kvůli harmonickému pohybu aplikovanému na strukturu nosníku a proto je potřeba jej usměrnit. [3]

Piezoelektrický jev lze popsat následujícími rovnicemi[10]:

$$\underline{S} = \underline{s}^E \cdot \underline{T} + \underline{d}^t \cdot \underline{E} \quad (2.2)$$

$$\underline{D} = \underline{d} \cdot \underline{T} + \underline{\epsilon}^t \cdot \underline{E} \quad (2.3)$$

Kde:

S ...tenzor deformace materiálu (pnutí)

T ...tenzor mechanického stresu

D ...vektor hustoty náboje

E ...vektor elektrického pole

s^E ...tenzor poddajnosti při nulovém nebo konstantním elektrickém poli

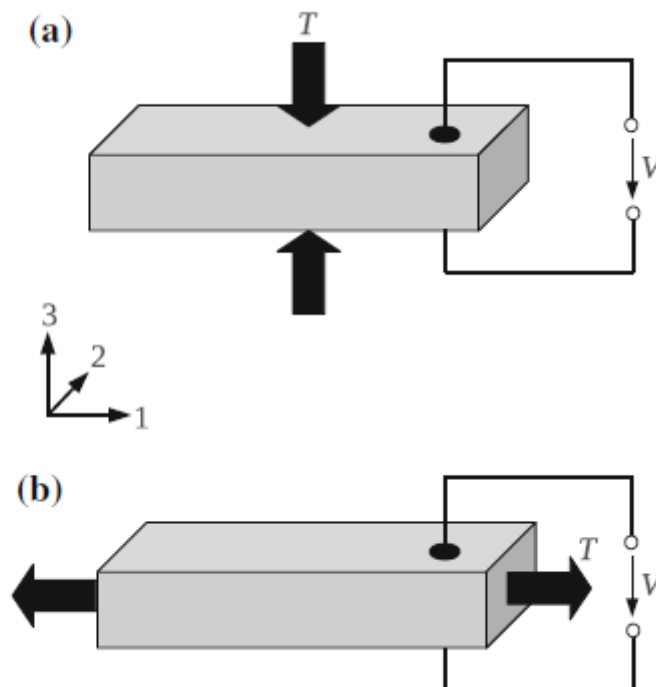
ε^T ...tenzor permitivity při nulovém nebo konstantním mechanickém stresu

d ...matice přímého piezoelektrického jevu (náboje)

d^t ...matice nepřímého piezoelektrického jevu (náboje)

Vedle přímého piezoelektrického jevu existuje ještě jev nepřímý, při kterém se krystal deformuje v důsledku působení vnějšího elektrického pole. Rovnice (2.2) popisuje nepřímý piezoelektrický jev a rovnice (2.3) jev přímý.[10]

Piezoelektrické měniče, které získávají energii z prostředí, se dnes používají ve dvou konfiguracích (Obrázek 4). Jedná se o tzv. módy 33 a 31. První číslo v každém módu (3) indikuje číslo osy (Obrázek 4), ve které je generováno elektrické napětí (osa z). Elektrody jsou tedy v obou módech umístěny v rovině kolmé k ose z. Druhé číslo v každém módu ukazuje na směr mechanického stresu. V módu 33 působí stres v té samé ose, v jaké je generováno elektrické napětí. V módu 31 však vzniká mechanický stres na ose x (1).

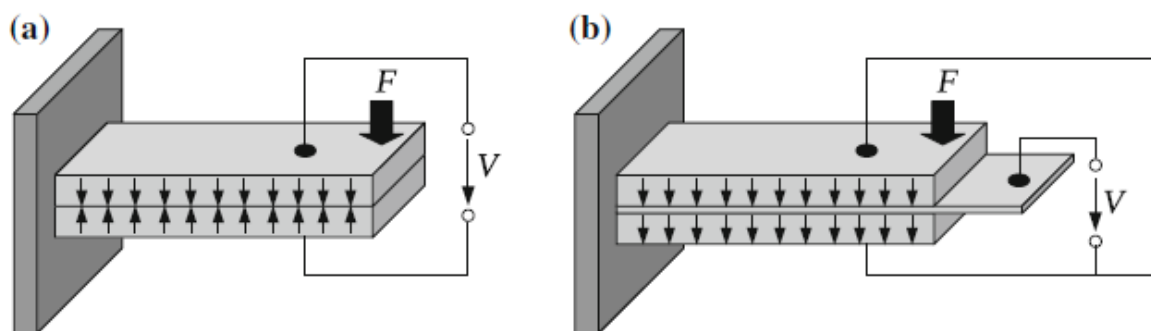


Obrázek 4 a) 33 konfigurace piezoelektrického měniče b) 31 konfigurace piezoelektrického měniče [10]

Konfigurace 31 se dnes hojně používá pro piezoelektrické měniče získávající energii z prostředí, často ve formě zmíněného vetknutého nosníku. Rovnice konfigurace 31 piezoelektrického měniče lze pak zjednodušit[10]:

$$S_1 = s_{11}^E \cdot T_1 + d_{31} \cdot E_3 \quad (2.4)$$

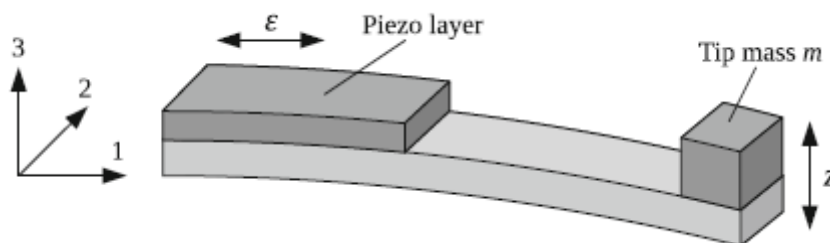
$$D_3 = d_{31} \cdot T_1 + \varepsilon_{33}^T \cdot E_3 \quad (2.5)$$



Obrázek 5 Piezoelektrický měnič s dvěma vrstvami piezoelektrického materiálu a) v sérii b) paralelně[10]

Piezoelektrické měniče bývají často vetknuté (Obrázek 5) a skládají se z jedné nebo dvou vrstev piezoelektrického materiálu. Mluvíme tak o unimorfním, či bimorfním piezoelektrickém měniči, přičemž bimorfni měniče mohou mít vrstvy piezomateriálu zapojeny sériově nebo paralelně (Obrázek 5). Síla F pak značí typické ohýbání piezoměniče, kdy na měnič působí kinetická energie ve formě nárazu či vibrací.[10]

Vetknutý piezoelektrický materiál je obvykle velice tuhý a nepoddajný, z čehož plynou vysoké rezonanční frekvence. Proto je implementována podoba nosníku (Obrázek 6), která přeměňuje velké vychýlení v ose z (3) na menší deformaci ε v ose x (1). To vede k menší tuhosti, zvýšení celkového pnutí a snížení rezonanční frekvence na 100-200 Hz, tedy do frekvenčního spektra reálných praktických vibrací. Navíc se na hrot piezoměniče často přikládá závaží pro další vylepšení vlastností.[10]



Obrázek 6 Nosníková struktura piezoelektrického měniče; tip mass m – závaží na hrotu měniče, piezo layer – vrstva piezoelektrického materiálu[10]

2.3.3 Kinetické měniče pracující na principu elektrostatické indukce

Elektrostatické měniče pracují na principu nabíjení kapacitních desek. Vibrace nebo pohyb separují (oddalují) desky už nabitého kondenzátoru, čímž modifikují jeho kapacitu. Pohyblivá část elektrostatického měniče se pohybuje proti elektrickému poli, čímž vzniká energie. Změna kapacity mění napětí na kondenzátoru podle vzorce: [1][6]

$$Q = CU \quad (2.6)$$

Kde:

Q ...náboj na kondenzátoru [C]

C ...kapacita kondenzátoru [F]

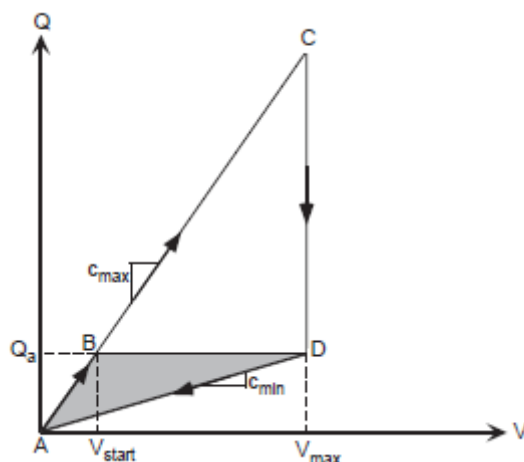
U ... napětí na kondenzátoru [V]

Pokud je snížena kapacita (zvýšením separace kondenzátorových desek) zvětší se napětí na kondenzátoru, protože je na něm náboj. Proto je možno mechanickou energii v podobě vibrací či pohybu, která zvyšuje separaci desek, převést na energii elektrickou.[1][13]

U elektrostatických měničů rozeznáváme dva typy kapacitorů: deskový (paralelní) kondenzátor s konstantním nábojem a kondenzátor s hřebenovou strukturou, jenž operuje s konstantním napětím. Klasický deskový kondenzátor využívá změny vzdálenosti mezi samotnými elektrodami, zatímco kondenzátor s hřebenovou strukturou změny plochy překryvu mezi elektrodami. V obou případech se jedná o kondenzátory založené na projevu Coulombovských sil mezi různě nabitými vodiči.[6][12]

Na obrázku níže (Obrázek 7) je příklad procesu nabíjení a vybíjení deskového kondenzátoru s konstantním nábojem (cesta A-B-D-A) a hřebenového kondenzátoru s konstantním napětím (cesta A-C-D-A). Plochy, které jsou ohraničeny oběma cestami (šedá a bílá), představují získanou energii. [6] Tento příklad je převzat z práce [13] a zobrazen.

Při konstantním náboji cyklus začíná v momentě, kdy je kapacita na svém maximu. Napěťový zdroj nabije kondenzátor na počáteční napětí V_{START} , které je menší než V_{MAX} , a proto se cyklus přesune z bodu A do bodu B. Přechod z bodu B do bodu D představuje změnu kapacity desek v důsledku příchodu kinetické energie (vibrací) z maximální kapacity C_{MAX} na hodnotu minimální C_{MIN} a to celé při konstantním náboji. Se zmenšující se kapacitou při konstantním náboji se zvedá hodnota napětí až do maximální hodnoty. Poté se náboj vrací zpět a energie získaná z procesu je charakterizována přechodem z bodu D do bodu A.[6]



Obrázek 7 Princip elektrostatische konverze energie [6]

Při cyklu s konstantním napětím nabije napěťový zdroj kondenzátor na maximální napětí V_{MAX} , čímž se cyklus dostane z bodu A do bodu C. Přejchod z bodu C do bodu D opět symbolizuje pokles kapacity kondenzátoru z maximální hodnoty C_{MAX} do minima C_{MIN} . Kinetická energie (vibrace), která je na kondenzátor aplikována v tomto přechodu, je ve výsledku přeměněna na elektrickou energii s konstantním napětím. Přejchod z bodu D do bodu A opět charakterizuje získanou energii z procesu.[6]

Z výsledných ploch lze vidět, že z cyklu s konstantním napětím lze získat více energie, nicméně napěťový zdroj pro tento cyklus musí být výrazně větší.[6]

2.3.4 Energetické zisky a limity kinetických měničů

Maximální hodnoty získané energetické hustoty pomocí elektromagnetických, piezoelektrických a elektrostatičkých měničů jsou rozděleny na tzv. teoretické maximum a praktické, reálné maximum.

Energetická hustota elektromagnetického měniče je definována jako: [1]

$$u_{em} = \frac{1}{2} B^2 / \mu_0 \quad (2.7)$$

Kde:

B ...magnetické pole [T]

μ_0 ...permeabilita vakua [$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} H.m^{-1}$]

Pokud budeme předpokládat maximální hodnotu magnetického pole 1T, získáme maximální teoretickou hodnotu energetické hustoty 400 mJ/cm^3 . Reálná hodnota magnetického pole 0,1 T pak dává praktickou maximální hodnotu energetické hustoty 4 mJ/cm^3 . [1]

U piezoelektrických měničů je energetická hustota definována následovně: [1]

$$u_{pe} = 1/(2Y)\sigma_y^2 k^2 \quad (2.8)$$

Kde:

σ_y ...normálové napětí - mez kluzu materiálu

k ...elektromechanický spojovací koeficient

Y ...Youngův modul elasticity

Předchozí rovnice může být formulována i následovně: [1]

$$u_{pe} = 1/(2\varepsilon)\sigma_y^2 d^2 \quad (2.9)$$

Kde:

d ...konstanta piezoelektrického náboje

ε ...permitivita neboli dielektrická konstanta

Pokud použijeme piezoelektrický materiál v podobě vysoce kvalitního krystalu, maximální teoretická hodnota energie hustoty je 343 mJ/ cm^3 . Běžně používané piezoelektrické materiály nám však dávají reálnou hodnotu 19 mJ/ cm^3 . [1]

Energetická hustota elektrostatických měničů, jakými jsou třeba kondenzátory, je definována jako: [1]

$$u_{es} = \frac{1}{2} \varepsilon E^2 \quad (2.10)$$

Kde:

E ...elektrické pole

ε ...permitivita prostředí

Pokud bychom použili permitivitu vakua ($\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$) a maximální elektrické pole 100 MV/m , tak bychom dostali teoretickou hodnotu energetické hustoty 44 mJ/ cm^3 . Reálná hodnota elektrického pole 30 MV/m dává praktickou hodnotu energetické hustoty 4 mJ/ cm^3 . [1]

Pokud bychom tedy tyto limity vztáhli k frekvenci 1 Hz , což je frekvence lidské chůze, získali bychom praktické hodnoty výkonové hustoty 4 mW cm^{-3} pro elektromagnetické měniče, 18 mW cm^{-3} pro piezoelektrické měniče a 4 mW cm^{-3} pro elektrostatické měniče. Tyto hodnoty však pouze ukazují na limity metod přeměny energie jako takových, ne na skutečné hodnoty energie, které jsme prozatím schopni získat (ty jsou samozřejmě menší než je tato vypočtená praktická limitní hodnota). [4]

Skutečné hodnoty získaných energií při různých použití technologií získávajících elektrickou energii z kinetické energie prostředí jsou popsány v příložené rešeršní práci (Příloha I).

3 Metody a strategie pro implementaci low-power

Elektronická zařízení jsou z hlediska napájení limitována svou velikostí a spotřebou energie. Přestože se baterie zdokonalují a u displejů a procesorů se kontinuálně daří snižovat jejich spotřebu, celkově se životnost baterie a její velikosti ukazuje jako hlavní limitující faktor funkčnosti elektronických zařízení. Navíc zvyšující se míra využívání bezdrátových komunikačních sítí a technologií pouze umocňuje tento problém, jelikož komunikace spotřebovává relativně hodně energie.[5]

Elektrickou energii lze definovat jako integrál výkonu v čase. Pokud je výkon konstantní tak spotřeba energie je výkon vynásobený časem, během něhož je energie spotřebovávána. Snížení výkonu tedy ušetří energii pouze v případě, že se čas nutný k vykonání instrukce moc nezvýší. Proto se zavedla veličina nazvaná energetická efektivita e : [5]

$$e = \frac{\text{Ztráta energie pro určitý úkol}}{\text{Opravná celková ztráta energie}} \quad (3.1)$$

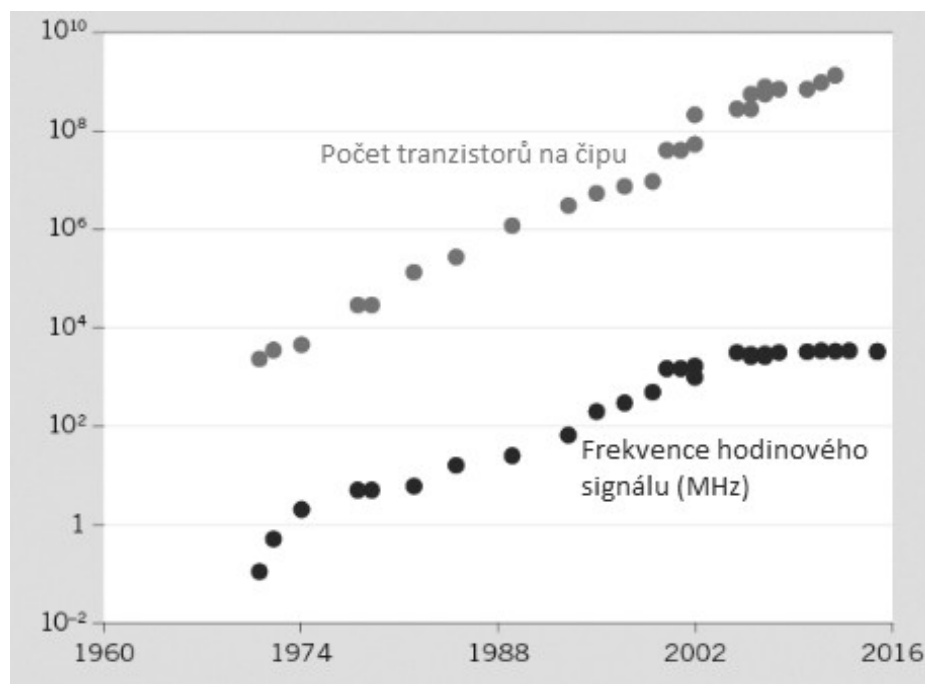
Škála instrukcí, které mohou být vykonávány, je rozmanitá. Může to být limitovaná funkce ve stylu vynásobení či sečtení, nebo to taky může být kompletní funkcionalita např. síťového protokolu. Proto je nutné přímo definovat části, které spotřebovávají nejvíce energie, a navrhnout řadu úsporných opatření v návrhu zařízení a jeho systému vedoucí k redukci spotřeby elektrické energie. [5]

3.1 Pokrok výpočetních technologií

Technologie polovodičů se v posledních desítkách let průběžně celkově zlepšovala a vedla k drastickému zmenšení velikosti tranzistorů, rychlejším obvodům, snížení energetických ztrát a značnému zhuštění počtu polovodičových součástek v pouzdře. [5]

Tento pokrok se více či méně řídil tzv. Mooreovým zákonem, což je empirické pravidlo, které v roce 1965 vyslovil Gordon Moore. Toto pravidlo říká, že zhruba každé dva roky se počet tranzistorů umístěných na integrovaném obvodu (čipu) zdvojnásobí. Nárůst počtu tranzistorů je obecně považován za indikátor zajišťující i lepší výkonnost čipů. Po určitou dobu způsobovalo každé zlepšení v tomto směru i automatické snížení spotřeby, jelikož procesor vykonával instrukce o poznání rychleji. Tento exponenciální trend, který přední světoví výrobci polovodičových obvodů následovali, způsobil miniaturizaci techniky v důsledku zvětšené koncentrace součástek na čipu. [14]

Společně se zvyšujícím se počtem tranzistorů na čipu rostla i frekvence hodinových signálů, na kterých mikroprocesory pracují (taktovací frekvence). Polovodičovou techniku však nelze zmenšovat a zrychlovat donekonečna bez určitých negativních důsledků. Skokový nárůst taktovací frekvence způsobil nečekaný problém – zvýšení spotřeby. Se sníženou vzdáleností součástek až na 90 nanometrů a rostoucí taktovací frekvencí začaly prudce stoupat tepelné ztráty v důsledku velkého zahřívání obvodů. Proto se od devadesátých let minulého století vědci a inženýři začali tématem snížení spotřeby intenzivně zabývat. Hodnota taktovací frekvence byla nakonec v roce 2004 ustálena (Obrázek 8).[14][15]



Obrázek 8 Vývoj počtu tranzistorů na čipu a frekvence hodinového signálu mikroprocesorů v důsledku Mooreova zákona[14]

3.2 Low-power techniky

Celkově lze metody snížení energetické spotřeby vestavěného systému rozdělit na několik úrovní (Tabulka 2). Jedná se o techniky na úrovni hardwaru, techniky pro napájecí systém, techniky pro výpočetní systém a techniky pro řízení periférií systému.[7]

Tabulka 2 Příklady low-power technik na různých úrovních[7]

Techniky na úrovni hardwaru

Efektivní výběr součástek

Eliminace statických proudů v zapojení

Konstrukce vypínatelných periférií a základních součástí systému

Techniky pro napájecí systém

Optimalizace pracovního bodu systému (MPPT – Maximum Power Point Tracking)

Úsporné módy DC/DC měničů (Power safe modes)

Techniky pro výpočetní systém (mikrokontrolér)

Periodické (adaptivní) spínání – běžný mód a úsporný mód

Optimalizace úsporného módu mikrokontroléru

Dynamická změna napájecího napětí (DVS – Dynamic Voltage Scaling)

Dynamická změna frekvence mikrokontroléru (DFS – Dynamic Frequency Scaling)

Techniky pro řízení periférií systému

Adaptivní měřící perioda senzorů

Adaptivní ukládání do paměti (interní, FRAM, EEPROM atd.)

Spínání napájení senzorů

Omezení datového přenosu

Událostmi řízený přenos dat

3.2.1 Techniky na úrovni hardwaru

Základem každého návrhu je výběr elektronických komponent s nízkou klidovou spotřebou. Tyto komponenty musí navíc umožňovat vypínání a podporovat pokročilé možnosti úsporných módů.[7]

Většina elektronických komponent je dnes vyráběna pomocí CMOS technologie. Hlavními prameny energetické spotřeby na CMOS čipu jsou statická a dynamická spotřeba. Statická energetická spotřeba je způsobena zkratovými proudy P_{sc} , řídicím proudem P_b a unikajícím proudem P_l . Dynamická energetická spotřeba P_d je způsobena skutečnou aktivitou obvodu. [5]

$$P = P_d + P_{sc} + P_b + P_l \quad (3.2)$$

Zdroje statické spotřeby jsou mnohdy stanoveny už na úrovni obvodu. Během přechodu na vstupu CMOS hradla mohou zařízení na kanálech p i n vést proud současně, čímž dočasně způsobí zkrat z napájení do země. Tento negativní efekt způsobuje ztrátu energie 10 až 15 %. Nižší napájecí napětí, které se dnes používá, přispívá ke snížení tohoto zkratového proudu. Staticky řízené CMOS hradla se už dnes příliš nepoužívají. Unikající proudy jsou z hlediska spotřeby energie nevýznamné ve většině návrhů. Obecně tedy lze říci, že při dobrém návrhu CMOS hradla je statická spotřeba pouhým zlomkem dynamické spotřeby, která tak pokrývá většinu 90 % celkové energetické spotřeby. Dynamická spotřeba energie CMOS roste kvůli nabíjení a vybíjení kapacit, které jsou na každém logickém hradle. Každý přechod z nižší do vyšší napěťové úrovně v digitálním obvodu způsobí změnu napětí, která vysává energii ze zdroje energie (napětí). [5]

Spotřeba v CMOS obvodech je taktéž úměrná kapacitanci. Proto je např. snížení kapacitance jednou z cest pro celkové snížení spotřeby. Jde o to, že připojení k externím komponentám mají často daleko větší kapacitanci než interní propojení na čipu. Proto je důležité používat co nejméně externích výstupů a používat je pokud možno co nejméně. Například přístup k externí paměti spotřebovává mnoho energie, proto je lepší ji pokud možno „přemístit“ přímo na čip do cache paměti a registrů. [5]

Další možnou technikou na hardwarové úrovni je eliminace statických proudů. Ty mohou být způsobeny zapojením odporové zátěže mezi napájecí napětí a zem (pull-up a pull-down rezistory). Tímto zapojením je ovlivněna spotřeba zařízení. Pro systém je dále přínosné, aby periferie byly vypínatelné, a pokud by jejich klidová spotřeba i ve vypnutém stavu byla velká, je možno je vypínat pomocí externích výkonových prvků.[7]

3.2.2 Techniky pro napájecí systém

Optimalizace pracovního bodu systému (MPPT) je technika, která maximalizuje přenos získané energie z energetického měniče (např. kinetického měniče, solárního panelu). Výkonová charakteristika energetických měničů je nelineární, což znamená, že maximální výkon závisí na pracovním bodě za určitých podmínek. Tato technika monitoruje příchozí energii z energetického měniče, čímž rozezná optimální bod systému. Řídící prvek MPPT měří proud a napětí z energetického měniče a následně ovládá D/A převodníkem elektroniku DC/DC měniče. V důsledku to pak může být použito k přizpůsobení zátěže.[16]

Zvolené DC/DC měniče musí být navrženy tak, aby zajišťovaly maximální efektivitu vzhledem k vhodně zvolené zátěži. Měly by tedy obsahovat režimy šetřící energii, zvláště v případě, je-li zařízení v úsporném režimu.[7]

3.2.3 Techniky pro výpočetní systém (mikrokontrolér)

Techniky pro výpočetní systém lze dále rozdělit do úrovně systémové, technologické a základní počítačové architektury (Tabulka 3). Důležitým aspektem celkového schématu návrhu low-power je zpětná vazba mezi jednotlivými úrovněmi. Systém musí být navrhován tak, aby odpovídal a dokázal navázat na techniky snížení spotřeby energie na nižších úrovních. [5]

Tabulka 3 Příklady low-power technik pro výpočetní systém[5] [7]

Úroveň systémová

Periodické (adaptivní) spínání – běžný mód a úsporný mód

Optimalizace úsporného módu mikrokontroléru

Úroveň technologická

Dynamická změna napájecího napětí (DVS – Dynamic Voltage Scaling)

Dynamická změna frekvence mikrokontroléru (DFS – Dynamic Frequency Scaling)

Omezení nepotřebné aktivity – Minimalizace přechodů a použití asynchronních obvodů

Úroveň architektury počítače

Využití paralelismu

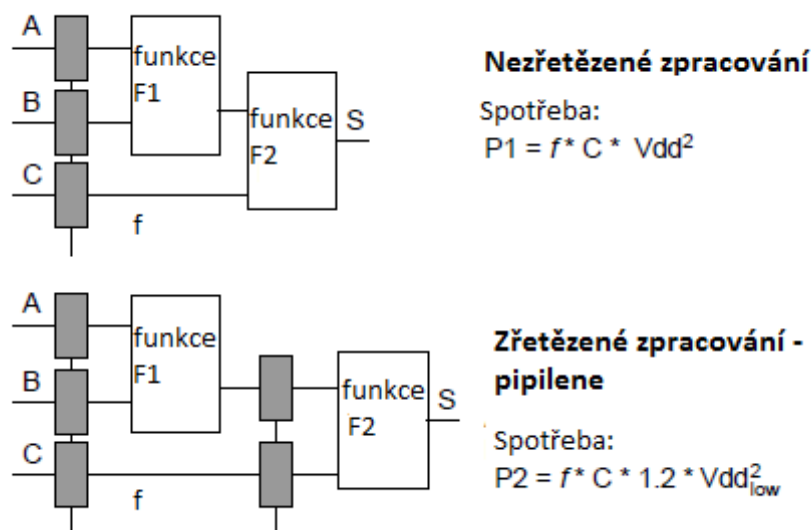
Organizace paměti

Pipelining – zřetěžené zpracování

3.2.3.1 Techniky pro výpočetní systém na úrovni architektury počítače

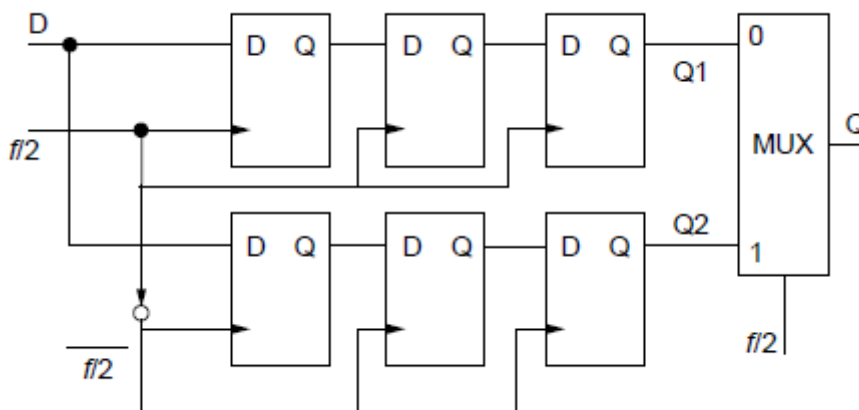
Tyto naprosto elementární a dnes už samozřejmé techniky snížení spotřeby byly popsány už na prvních konferencích v 90. letech minulého století, nicméně budou níže stručně vysvětleny.

Pipelining je zřetěžené zpracování instrukcí, kdy je jedna instrukce rozdělena na více částí, které mohou být procesorem zpracovávány najednou. Zřetěžené zpracování je rychlejší než nezřetěžené, což umožňuje operaci na stejné frekvenci, ale s nižším napájecím napětím (Obrázek 9). V důsledku nižšího napájecího napětí lze výrazně snížit dynamickou spotřebu.[15]



Obrázek 9 Nezřetěžené zpracování vs pipelining[15]

Paralelismus je další základní technikou pro snížení operační frekvence a zároveň napájecího napětí. Paralelní architektura se uplatnila např. u pamětí, datových toků či posuvných registrů. Paralelismus u posuvných registrů je znázorněn níže (Obrázek 10). Vstup D je přiveden na obě poloviny registru na poloviční frekvenci $f/2$, přičemž multiplexor dává výstup Q na původní frekvenci f . Počet operací paralelního registru je stejný jako u neparalelního, ale jelikož operuje na nižší frekvenci, může být napájen nižším napětím, což vede ke snížení dynamické spotřeby. [15]



Obrázek 10 Paralelismus u posuvných registrů[15]

Další možností je použití vhodné organizace paměti. Základním principem je ukládání kódu často vykonávaných instrukcí nebo často používaných dat do malé paměti co nejbližší procesoru (cache paměť). Pokud je často čteno z menší paměti, dojde ke snížení spotřeby energie. [15]

3.2.3.2 Techniky pro výpočetní systém na úrovni technologické

Jednou z nejefektivnějších možností jak snížit dynamickou spotřebu procesoru je snížení napájecího napětí. Spotřeba energie totiž kvadraticky klesá se sníženým napájecím napětím. Tudiž pokud snížíme napětí z 5 na 3,3 V, dojde k redukci spotřeby o 56%. Samozřejmě s nižším napětím přichází i snížení výkonnosti zařízení. Také se snižováním napětí se zvyšuje zpoždění. [5][16]

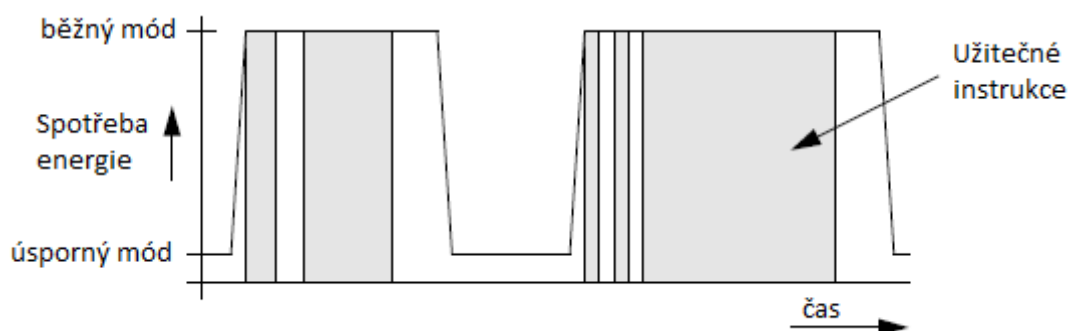
Snížení taktovací frekvence zajistí lineární snížení dynamické spotřeby energie, nicméně neovlivňuje energii spotřebovanou během vykonání jedné instrukce – protože provedení toho samého úkonu pak trvá déle, a systém tak musí běžet déle. Dynamická změna frekvence a napětí dávají dohromady kombinaci ovlivňující rychlost vykonávání instrukcí a spotřebu energie. Je tedy běžnou praxí nejdříve zlepšit architekturu modulu, například zavedením paralelního hardwaru a poté snížit napětí jak jen to je možné při zachování požadované funkčnosti. [5][16]

Spotřeba energie je proporcionální frekvenci, na které signály přechází ze stavu 0 na 1. Také je proporcionální ke kapacitanci na signálovém vodiči. Tohle platí pro každý signálový vodič v systému, ať už je to hodinový signál, datový pin či adresová linka. To ukazuje, že spotřeba energie může být snížena redukcí počtu přechodů.[5]

Další metodou snížení spotřeby je asynchronní návrh. CMOS je dobrá technologie pro low-power implementaci, jelikož hradla spotřebovávají energii, pouze když jsou spouštěna. Za normálního stavu bychom předpokládali, že spouštění hradel nastaven jen v momentě, kdy se vykonává užitečný proces, nicméně toto není pravda u synchronních obvodů. Mnoho hradel se totiž spouští jen proto, že jsou připojeny ke zdroji hodinového signálu a nevykonávají žádnou přínosnou funkci. Největším hradlem je řadič hodinového signálu, který musí rozeslat hodinový signál do všech částí obvodu, a proto musí být spínán pořád, aby zajistil časovou referenci, a to i když jen malá část čipu je aktivní. Synchronní obvod tím pádem mrhá energií, příkladem budiž pohyblivá desetinná čárka při počtech s datovým typem integer. [5]

3.2.3.3 Techniky pro výpočetní systém na úrovni systémové

Mnohé systémy vykonávají užitečné instrukce jen po určitou dobu, přičemž poté jsou po dlouhou dobu nečinné. To neznamená, že by byly vypnuté, ale že po tuto dobu nevykonávají žádný produktivní proces či užitečné instrukce. Proto je výhodné po tuto nečinnou dobu přerušit hodinový signál do nepotřebných částí a omezit tak jejich napájení. Tato technika (Obrázek 11), umožňující optimalizaci spotřeby, se nazývá adaptivní spínání – systémový přechod mezi běžným výpočetním módem procesoru a úsporným režimem, kdy mikrokontrolér „spí“. Adaptivní spínání lze realizovat staticky nebo dynamicky, kdy systém přechází do úsporného režimu a následně se z něj probouzí v závislosti na dostupné energii např. energii z prostředí. [5][7][16]



Obrázek 11 Metoda adaptivního spínání pro výpočetní systém [5]

Samotný úsporný režim procesoru (mikrokontroléru) lze dále optimalizovat, jelikož dnešní mikrokontroléry disponují řadou těchto módů. Liší se zejména počtem částí, které nejsou v tomto režimu napájeny. U těch nejúspornějších módů nemusí napájeny ani SRAM paměti, přičemž jediným zdrojem přerušení pro probuzení z úsporného režimu může být externí referenční hodinový signál. [7][17]

3.2.4 Techniky pro řízení periférií systému

Samostatnou kapitolou je snížení spotřeby u periférií systému, jako jsou například senzory nebo vysílač RF signálu. Pro tyto techniky je důležité identifikovat veškeré zdroje energetických ztrát: [18]

1. Spotřeba při snímání – spotřeba energie senzoru pro samotný proces snímání nějaké fyzikální veličiny z prostředí. Tato energie se pro různé typy senzorů podstatně liší.
2. Spotřeba při komunikaci – periferie spotřebovává energii při jakémkoli transferu (přijímání či vysílání) dat do hlavní výpočetní části.
3. Spotřeba při zpracování instrukcí – samotná periferie může mít svůj řídicí systém (procesor nebo mikrokontrolér). Při jakémkoli zisku dat senzoru jsou často prováděny dodatečné instrukce přímo v takové periférii systému.

Pro snížení spotřeby senzorů se celkově používají techniky podobné těm u procesorů. Základní metodou adaptivní měřicí metoda, jejímž principem je odpojování napájení periférií nebo uvádění periférií do úsporného režimu, a to v souladu s režimy výpočetního systému. Navíc je možno periferie spínat po určitou pevnou dobu, nebo je lze opět spínat v závislosti na dostupné energii. U periférií zajišťující jsou dále důležité techniky upravující poměr ukládání dat do interní paměti a dálkový přenos. [7][16]

4 Koncepty funkčnosti bez-bateriových systémů

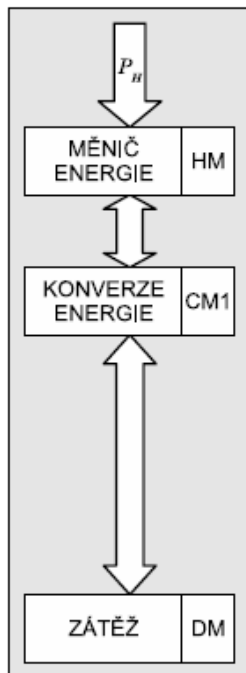
Mezi základní konstrukční podmínku energeticky nezávislého zařízení se řadí zejména energetická neutralita. Tato podmínka stanovuje, že spotřeba energie navrženého zařízení nemůže překročit hodnotu energie, jež je zařízením získána z vnějšího prostředí. Díky této myšlence může zařízení fungovat v teoreticky neomezeném operačním čase. Pokud by došlo k nesplnění této podmínky, systém by přestal řádně pracovat. [16]

Podkapitoly 4.1, 4.2 a 4.3 řešené problematiky se vztahují k možnému technickému uspořádání zařízení a matematickému popisu těchto systémů.

4.1 Přímý bez-bateriový model

Přímý bez-bateriový model dokáže dodat aktuální požadované množství energie, přičemž je potřebná energie vytvořená z vnějších dostupných zdrojů. Pracuje tedy bez použití baterií. Z předložených faktů je jasné, že zařízení je schopno správné funkce jen v případě dostupné energie z prostředí. Vedle toho životnost a výkon modelu nejsou nikterak omezovány vlastnostmi energetického úložiště, tedy baterie či superkapacitoru. Nejvýraznějšími vlastnostmi, které mají největší vliv na systém, jsou například samo-vybíjení, stárnutí úložiště, ztráty při ukládání energie a omezený počet cyklů. [7][16]

Konstrukce takového zařízení je založena zejména na podmínce energetické neutrality, která byla popsána v úvodu kapitoly. Vnější prostředí, ve kterém zařízení pracuje, poskytuje tomuto zařízení potřebnou energii, která úzce souvisí s výkonem systému. Systém tedy musí být navržen s ohledem na maximální výkon, kterého jsou, s ohledem na prostředí, zařízení schopna dosáhnout. [16]



Obrázek 12 Topologie napájecího systému – přímý bez-bateriový model[7]

Dle daných požadavků na provoz přímého bez-bateriového modelu je vhodné použít náležité metody řízení spotřeby a funkčnosti zařízení, které jsou schopny odhadnout budoucí dostupnost energie. Systémy odpovídající stanoveným požadavkům s předpovídajícími postupy jsou použitelné v prostředí, které nám nabízí energii měnící se v závislosti na čase. [7]

Obrázek 12 znázorňuje základní organizaci přímého bezbariérového modelu, který se skládá ze tří částí. Patří zde modul pro získání energie označený HM (Harvesting Module), modul pro konverzi energie CM (Converter Module) a modul spotřebiče značen jako DM (Dissipation Module).

Klíčová nevýhoda přímého bez-bateriového modelu se zakládá na nevyužití a ztrátě přebytečné energie. Tedy energie, která se spotřebičem nespotřebuje. Z tohoto pohledu je model čistým zdrojem energie a nadměrné množství získané energie se nemá kde akumulovat. Proto je modul pro konverzi hardwarově řešen jako DC/DC měnič, který přímou cestou přivádí energii spotřebiči. Model získává energii po určitý časový interval. Množství energie se poté dá vyjádřit uvedeným způsobem [7]:

$$E_H(t_1, t_2) = \int_{t_1}^{t_2} P_H(t) dt \quad (4.1)$$

Vše se odvíjí od typu získané energie a také druhu použitého měniče HM, protože tyto prvky ovlivňují náhodné vlastnosti zdroje energie. Z toho vyplývá, že distribuce výkonu v závislosti na čase $P_H(t)$ není konstantní. Zásadní výhoda uvedené struktury spočívá ve využití výhradně jednoho modulu CM, což má vliv na celkovou výkonovou ztrátu popisovaného systému. Součástí CM modulu může být i prvek realizující metodu k získávání maximální možné energie z měniče označovaný MPPT (viz kapitola 3.2.2). Systém přenáší energii jednotlivými částmi od zdroje po spotřebič s určitou celkovou efektivitou, kterou můžeme následovně:[7]

$$E_D(t_1, t_2) \leq \int_{t_1}^{t_2} P_H(t) \cdot \eta(u, i) dt \quad (4.2)$$

Kde:

$\eta(u, i)$... nelineární koeficient celkové efektivity konverzního modulu CM

$u(t)$... napětí v čase

$i(t)$... proud v čase

Koeficient η může být asymptoticky přiblížen spojitou či po částech lineární funkcí. Jestliže bude koeficient modelován pomocí experimentálního měření, jedná se o nelineární funkci. [7]

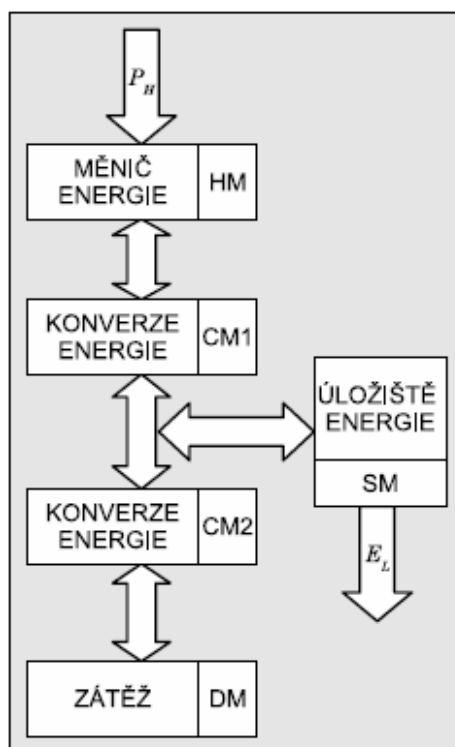
4.2 Hybridní systém s energetickým úložištěm

Tato kapitola se zabývá nejčastěji používanou topologií v monitorovací a komerční elektronice. Jako předešlý model i hybridní systém s energetickým úložištěm používá pro své napájení kterýkoliv zdroj z prostředí. Struktura obsahuje implementovatelný hardwarový zásobník energie realizovaný

v podobě baterie nebo superkapacitoru. Získaná energie z okolního prostředí je využita na provoz a zajištění správné funkčnosti zařízení a dále je využívána k dobíjení zásobníku energie. Díky této skutečnosti se zvyšuje operační doba v porovnání s přímým bezbateriový modelem. Vhodně zvolená metoda řízení, pro tuto strukturu, zachovává kontinuální provoz. Nepřipouští tedy výpadky zařízení kvůli vyčerpání energie. [16]

Koncept energetického zásobníku spolu s modulem pro získávání energie z okolního prostředí se odvíjí od nároků samotného zařízení. Návrh by měl splňovat energetickou neutralitu. Systém nemá spojitou spotřebu energie, ale odvíjí se od aktuálních potřeb, v různém čase tedy může spotřebovat více energie než je dodávána z okolního prostředí přes zásobník energie. Celková bilance energie musí být v takovém systému vyvážená v delším časovém intervalu. Nesmí se opomenout samovybíjení energetického zásobníku, které je způsobeno stavbou nabíjecí baterie či superkapacitoru. [16]

Níže uvedený Obrázek 13 znázorňuje celou strukturu popisovaného modelu a zahrnuje i samovybíjecí proud. Uplatňují se zde tři základní moduly, uvedené u předchozího modelu, tedy HM, CM a DM, tyto moduly jsou doplněny energetickým zásobníkem, který je označen jako SM (Storage Module).



Obrázek 13 Topologie napájecího systému – hybridní systém s energetickým úložištěm[7]

Pokud bude funkčnost modelu vyjádřena matematicky lze $P_H(t)$ pokládat za spojitou funkci v oboru hodnot, kde se spojitě mění parametr času t . $P_H(t)$ lze pokládat za vhodný zdroj pro popisovaný systém v případě, že konečný časový interval $t_2 - t_1$ splňuje níže uvedené nerovnice. [7]

$$\int_{t_1}^{t_2} P_H(t) dt \geq \rho(t_2 - t_1) - \sigma_1 \quad (4.3)$$

$$\int_{t_1}^{t_2} P_H(t) dt \leq \rho(t_2 - t_1) + \sigma_2 \quad (4.4)$$

Kde:

P_H ... energie získaná z prostředí

σ_1, σ_2 ... koeficienty kapacity zásobníku energie

Zjišťování koeficientů σ_1, σ_2 se realizuje pomocí praktického měření. V ideálním případě je zařízení napájeno pomocí $(\rho, \sigma_1, \sigma_2)$ -zdroje energie a má konstantní spotřebu. V této situaci zařízení zcela využívá energetický zdroj a teoreticky funguje v nekonečném čase. Za zásobník elektrické energie se nejčastěji považuje nabíjecí baterie nebo superkapacitor, který je dán svou omezenou kapacitou E_C . Uvedená kapacita úzce souvisí s uloženou energií E_S , neboť pokud dojde k vyrovnání E_S s E_C energie dosáhne svého maxima a dojde k takzvanému přetečení a ztracení další příchozí energie. V tomto okamžiku se mohou vyslovit dva hlavní limitní stavy. Prvním ze stavů je indikace nízkého stavu energie $E_{\theta L}$ (rovnice 4.5), kdy není splněno požadované nabití a na základě toho je zařízení uvedeno do režimu spánku, přičemž zbývající energie je využita k udržení obsahu vitálních pamětí v systému. Za druhý stav se považuje vysoká úroveň energie $E_{\theta H}$, kdy energie přesáhne stanovený práh a zařízení se dostane z režimu spánku do stavu normální funkce. [7]

$$E_{\theta L} \leq E_S(t) \leq E_C \quad (4.5)$$

Kde:

$$E_C \geq \sigma_1 + \sigma_2$$

Na základě uvedených skutečností může být hybridní systém s ideálním energetickým úložištěm popsán níže uvedeným matematickým modelem: [7]

$$\int_{t_1}^{t_2} \frac{P_D(t)}{\eta_2(t)} dt \leq \int_{t_1}^{t_2} P_H(t) \cdot \eta_1(t) dt + E_S \quad (4.6)$$

Kde:

P_D ... příkon zařízení

P_H ... získaný výkon z prostředí

E_S ... uložená energie

η_1, η_2 ... koeficienty efektivity energetických modulů CM1 a CM2, závisí na pracovních bodech modulu HM - η_1 a DM - η_2 , jedná se o nelineární závislosti na napětí a proudu

Rovnice (4.6) popisuje ideální stav, ve výpočtu se však musí uvažovat samovybití energetického úložiště P_L a tento fakt je zahrnut v následující rovnici: [7]

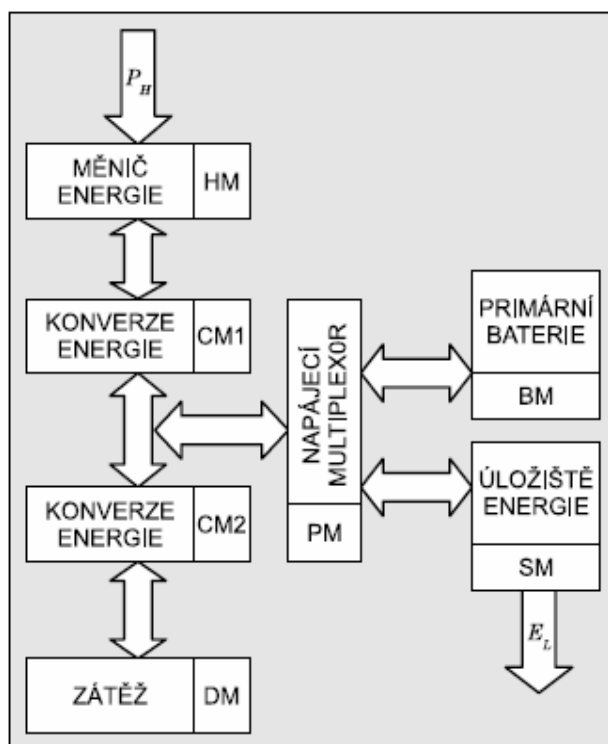
$$\int_{t_1}^{t_2} \frac{P_D(t)}{\eta_2(t)} dt \leq \int_{t_1}^{t_2} P_H(t) \cdot \eta_1(t) dt + E_S - \int_{t_1}^{t_2} P_L(t) dt \quad (4.7)$$

Kde:

P_L ...ztrátový příkon udán samovybíjecí baterií nebo superkapacitorem

4.3 Systém s primární baterií

Jedná se o systémy, které pracují s primárními nenabíjecími bateriemi nebo se sekundárními nabíjecími bateriemi, tyto baterie slouží jako základní zdroj energie. Dokud v baterii zbývá energie tak je systém schopný operace a tím pádem není přímo závislý na získávání energie z prostředí. Vedle těchto základních zdrojů se v systému objevují i záložní zdroje založené na získání energie z okolního prostředí, které napájí spotřebič či jeho funkční bloky. Řídící algoritmus je založen na potlačení základních zdrojů energie a zajištění zvýšení operačního času zařízení. Uvedené řešení zvyšuje spolehlivost sběru vzorků, jejich zpracování a přenos nadřazenému systému za předpokladu, že bateriový systém disponuje dostatečným množstvím energie a primární zdroj není vyčerpán. [16]



Obrázek 14 Topologie napájecího systému – systém s primární baterií [7]

V modelu (Obrázek 14) se nově objevuje bateriový blok BM (Battery Module) a multiplexor mezi zdroji energie PM (Power Multiplexer). Matematický popis uvedeného systému, lze odvodit z předchozího modelu [7]:

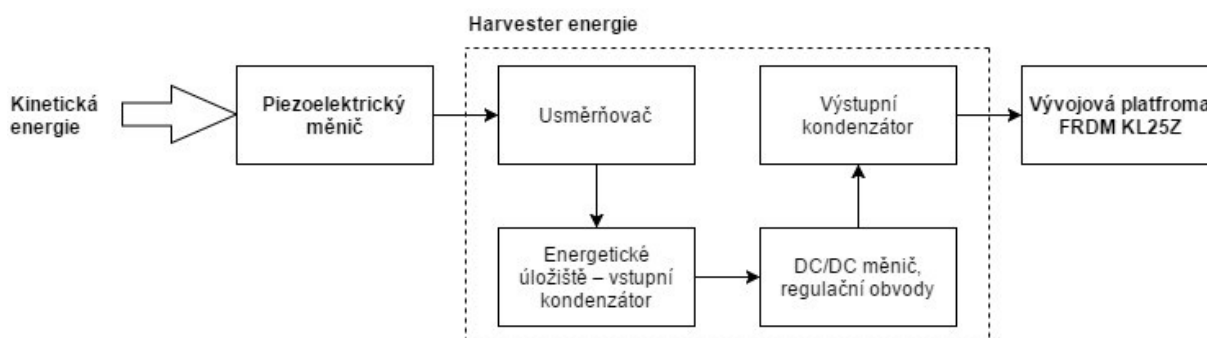
$$\int_{t_1}^{t_2} \frac{P_D(t)}{\eta_2(t)} dt \leq \int_{t_1}^{t_2} P_H(t) \cdot \eta_1(t) dt + E_S + E_B - \int_{t_1}^{t_2} P_L(t) dt \quad (4.8)$$

Kde:

E_B ... celkové množství energie uložené v primárním zdroji

5 Návrh vlastního řešení pomocí vývojových kitů

Na základě zpracovaných teoretických poznatků byl navržen vlastní, bez-bateriový hybridní koncept s úložištěm (typologie popsána v kapitole 4.2) pro napájení low-power zařízení pomocí kinetického měniče.



Obrázek 15 Blokové schéma navrhnutého konceptu

V jednotlivých podkapitolách budou detailně popsány, specifikovány a odůvodněny jednotlivé funkční bloky návrhu (Obrázek 15), nicméně v následujících odstavcích je popsán princip fungování návrhu.

Na začátku řetězce je zdroj kinetické energie v podobě elektrického motoru SGM20F-180SHV-62.5-R (Shenzhen Shenguang Science & Technology Co. Ltd., Hong Kong, Čína), který se svou nízkou frekvencí otáčení simuluje dodání kinetické energie z prostředí. Elektromotor v pravidelných intervalech ohýbá volný konec piezoelektrického měniče PPA-1011 (Midé Technology, Medford, USA) ve tvaru vetknutého nosníku, čímž měnič rozvibruje a předá mu tak kinetickou energii. Ohyb základny vyvolá dynamickou deformaci piezoelektrického materiálu (PZT-5H) umístěného ve vnitřní vrstvě piezoměniče a díky přímému piezoelektrickému jevu je na elektrodách přivedených na piezomateriál měniče generováno střídavé napětí.

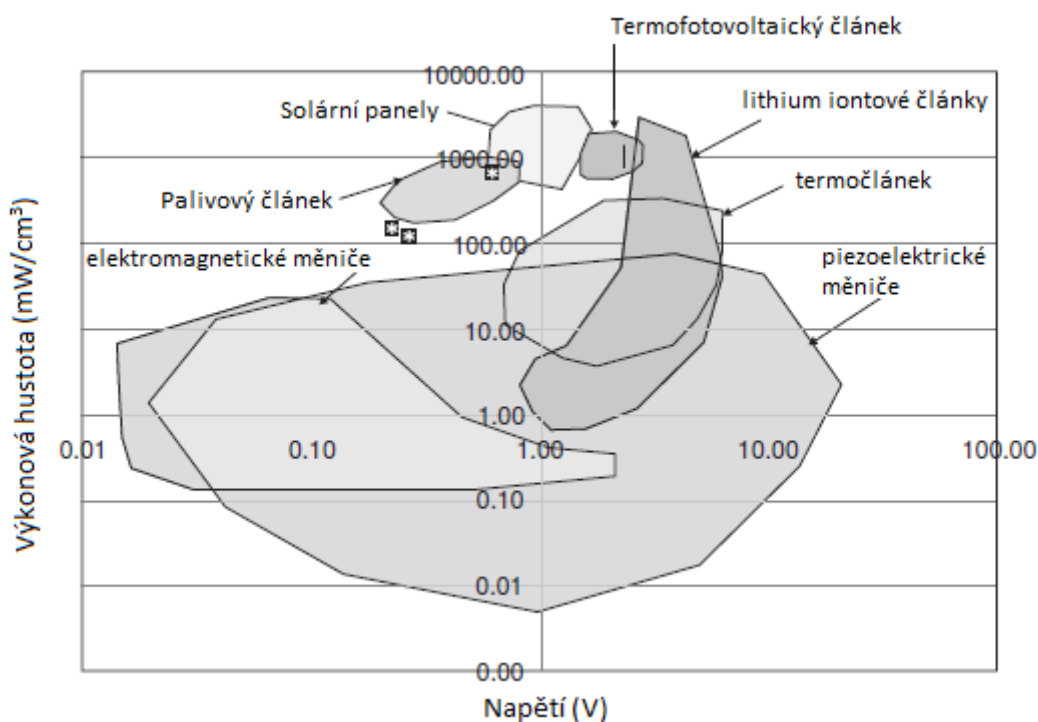
Získané střídavé napětí je přivedeno na piezoelektrické vstupy vývojové desky Energy Harvester Breakout - LTC3588 (Sparkfun, Nivot, USA), jejíž základ tvoří harvester energie LTC3588 (Linear technology, Milpitas, USA). Tento vývojový kit je navržen speciálně pro zpracování energie z prostředí (solární energie, vibrace atd.). Střídavé napětí je nejdříve usměrněno pomocí Graetzova můstku a poté přivedeno na energetické úložiště, na kterém se ukládá elektrický náboj. Energetické úložiště v této diplomové práci představoval elektrolytický kondenzátor o kapacitě 100 μF . Po dobu, kdy napětí na úložišti překračuje určitou mez, pracuje DC/DC měnič harvesteru jako snižovač napětí, který s relativně vysokou účinností převádí napětí z úložiště na výstupní kondenzátor o kapacitě 10 μF . Na výstupu harvesteru je tak držena DC/DC měničem stabilní hodnota stejnosměrného napětí.

Z výstupu harvesteru je stejnosměrným proudem napájena vývojová deska FRDM KL25Z (NXP, Eindhoven, Nizozemsko), která obsahuje mikrokontrolér Kinetis® L Series KL25. Smyslem této levné vývojové desky bylo nejen reprezentovat zařízení vykonávající nějaké užitečné instrukce, což v případě této práce bylo počítání FIR filtru 7. řádu, ale také simulovat spotřebu jakékoliv jiného

low-power zařízení, kterým mohou být různé senzory apod. Práce je tedy zaměřena na návrh takového bez-bateriového modelu, který by byl schopen low-power zařízení alespoň dočasně napájet.

5.1 Kinetický měnič

Z možných typů kinetických měničů byl vybrán piezoelektrický měnič, a to hned z několika důvodů. Hlavními výhodami piezoelektrických materiálů při získávání energie z prostředí (vůči měničům elektromagnetickým a elektrostatickým) jsou jejich velká výkonová hustota, komerční dostupnost, snadná implementace a aplikace. [1][3]



Obrázek 16 Výkonové hustoty technologií získávající energii z prostředí a bateriových zdrojů v závislosti na napětí [3]

Jak vyplývá z obrázku nahoře (Obrázek 16), získané napětí či výkonová hustota elektromagnetických měničů je daleko menší než u piezoměničů, přičemž často jsou nutné další úpravy napětí tak, aby dosáhlo požadované amplitudy. Pro fungování elektrostatických měničů je zase nutné přivést externí napětí nebo náboj k tomu, aby relativní vibrační pohyb částic kapacitoru vytvořil střídavé elektrické napětí. U piezoměniče však pracujeme s dostatečným napětím, které získáváme přímo z piezoelektrického materiálu, a navíc není nutné přivádět žádné separátní externí napětí na kondenzátor jako u elektrostatických měničů. [3][19]

Piezoelektrické měniče je na rozdíl od elektrostatických měničů obecně těžké integrovat do mikro systémů, nicméně pro tuto práci tahle nevýhoda nebyla podstatná. Posledním důvodem této volby je fakt, že během posledního desetiletí byl z těchto tří metod přeměny kinetické energie největší zájem právě o piezoelektrickou přeměnu. [19]

5.1.1 Piezoelektrický měnič PPA 1011

Pro tuto práci byl vybrán piezoelektrický měnič PPA-1011 (Midé Technology, Medford, USA). Tento vysoce kvalitní piezoměnič s kapacitou 97 nF disponuje jednou vrstvou piezoelektrického materiálu PZT-5H (jedná se o tzv. „unimorph“). PPA-1011 je hermeticky a elektricky izolovaný, robustní a disponuje dvěma kontakty, pomocí kterých lze měnič jednoduše připojit k dalším blokům obvodu. Další nespornou výhodou je ověřená kompatibilita tohoto piezoměniče s vybraným harvesterem energie LTC3588, který výrobce piezoměniče doporučuje v technické dokumentaci.

Konfigurace piezoměniče

Z hlediska možných konfigurací, popsanych v kapitole 2.3.2, fungoval piezoelektrický měnič jako inerciální měnič získávající kinetickou energii z prostředí. Měl podobu vetknutého nosníku a operoval v módu 31.



Obrázek 17 Piezoelektrický měnič PPA-1011 [20]

Ukotvení piezoměniče

PPA-1011 byl při práci pevně ukotven pomocí kitu PPA-9001 (Midé Technology, Medford, USA) tak, aby měl podobu vetknutého nosníku.

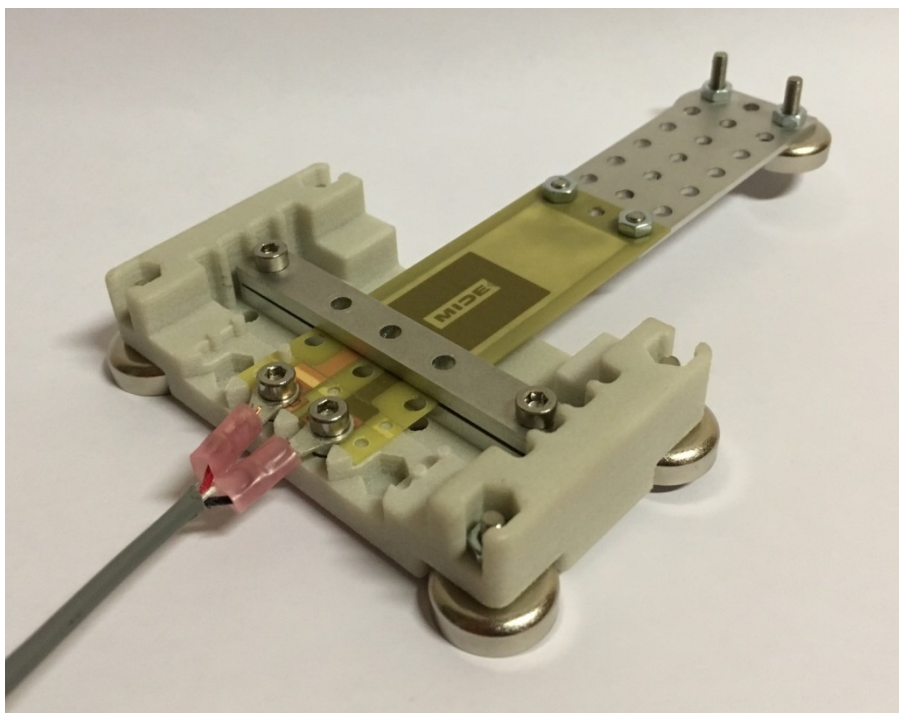
Vhodné pozice pro ukotvení měniče ke kitu jsou z hlediska získávání energie pozice „Clamp 0“ nebo „Clamp 6“. Pokud je piezoměnič ukotven v těchto pozicích, je pnutí uvnitř piezoelektrického materiálu největší, čímž je možno získat větší elektrické napětí.[20]

Naladění piezoměniče

Dalším důležitým faktorem je naladění vlastní rezonanční frekvence piezoměniče na frekvenci zdroje či prostředí, ze kterého vibrace přichází. Správně naladěný měnič má daleko vyšší výkonnost než ten nenaladěný.

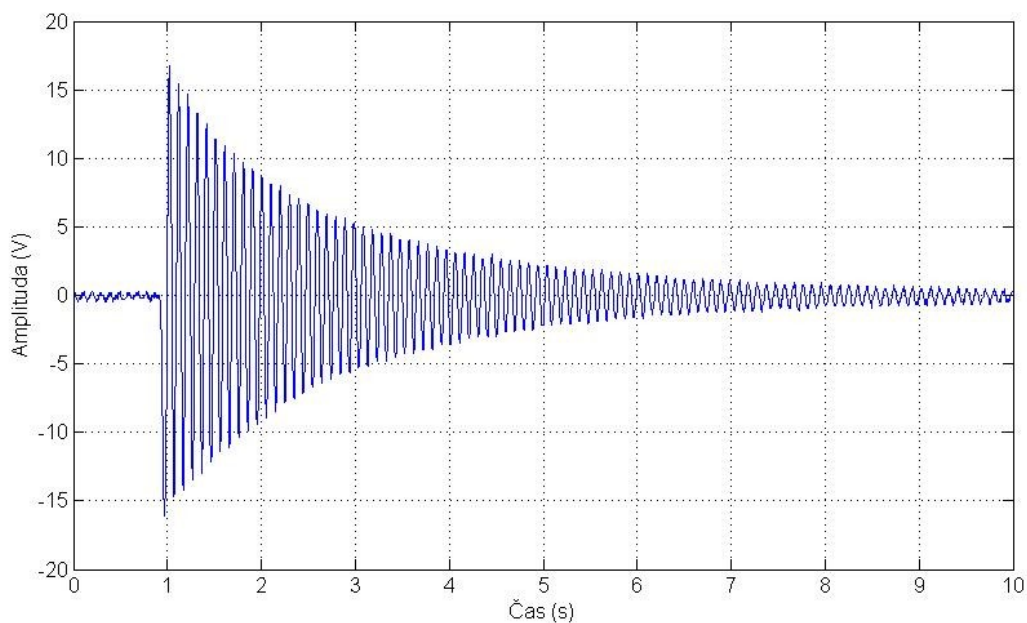
Čím nižší je frekvence (do určité hodnoty v jednotkách až desítkách Hz) vibrací zdroje a potažmo i měniče, tím větší je vychýlení (ohyb) koncového hrotu měniče (Peak to Peak Displacement). Větším ohybem volného konce měniče se zvětšuje získaná amplituda generovaného napětí, z čehož vyplývá i větší získaná energie. Snížení vlastní rezonanční frekvence měniče je možno dosáhnout prodloužením měniče, zatížením měniče na konci (hrotu) pomocí závaží či ukotvením měniče na pozici Clamp 0 (namísto Clamp 6). Vlastní rezonanční frekvence měniče byla zjištěna připojením jeho výstupu na osciloskop, a to pomocí jemného brnknutí do konce měniče. Druhým důležitým faktorem, který značně ovlivňuje výkonnost, je velikost zrychlení (v jednotkách g), kterým je piezoměnič mechanicky rozvibrován. Opět platí, že čím vyšší zrychlení, tím větší je získaná

energie. [20] Finální vizuální podobu ukotveného a naladěného měniče lze vidět na následujícím obrázku (Obrázek 18).



Obrázek 18 Ukotvený a naladěný měnič PPA-1011

Z důvodu co nejefektivnějšího získávání energie byla vlastní frekvence piezoměniče snížena na 10 Hz (Obrázek 19) což je frekvence velmi blízká zdroji vibrací, která byla přibližně 1,33 Hz (Obrázek 22). Přidáním závaží či prodlužováním piezoměniče pro případné další snížení jeho vlastní frekvence už hrozilo jeho zlomení.



Obrázek 19 Vlastní frekvence piezoměniče PPA-1011

5.2 Zdroj kinetické energie

Zdrojem pravidelných ohybů volného konce piezoměniče byl elektrický motor s převodovkou SGM20F-180SHV-62.5-R (Shenzhen Shengguang Science & Technology Co. Ltd., Hong Kong, Čína). Na hřídel motoru bylo připevněno plastové rameno o délce 5 cm, které s pravidelnou frekvencí mechanicky ohýbalo konec základny měniče (Obrázek 21). V důsledku toho byla piezoměniči pravidelně dodávána kinetická energie a ten tím pádem zůstával rozkmitaný.

Frekvence motoru byla vzhledem k standardní hodnotě RPM při jmenovitém zatížení snížena v důsledku použití nižšího napájecího napětí 1,5 V. To vedlo k získání pravidelného průběhu střídavého napětí na výstupu piezoměniče (Obrázek 22).

Elektrickým motorem s připevněným plastovým ramenem na hřídeli byl nahrazen elektrodynamický vibrátor. Tento vibrátor, který je možno řídit přímo zesílenou sinusovou vlnou z funkčního generátoru, bývá v odborných člancích často používán k simulaci vibrací z prostředí, pro tuto práci však nebyl k dispozici. [21]



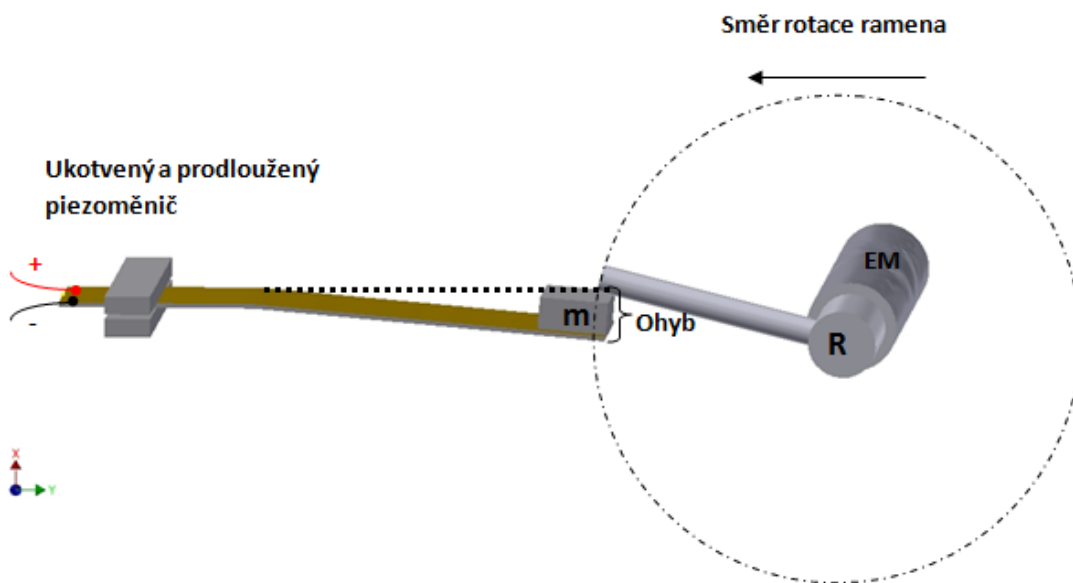
Obrázek 20 Elektromotor SGM20F-180SHV-62.5-R

Parametry elektrického motoru, kdy otáčky, krouticí moment a proud jsou hodnoty při jmenovitém zatížení, lze vidět uvedeny v tabulce níže (Tabulka 4).[22]

Tabulka 4 Parametry elektromotoru SGM20F-180SHV-62.5-R

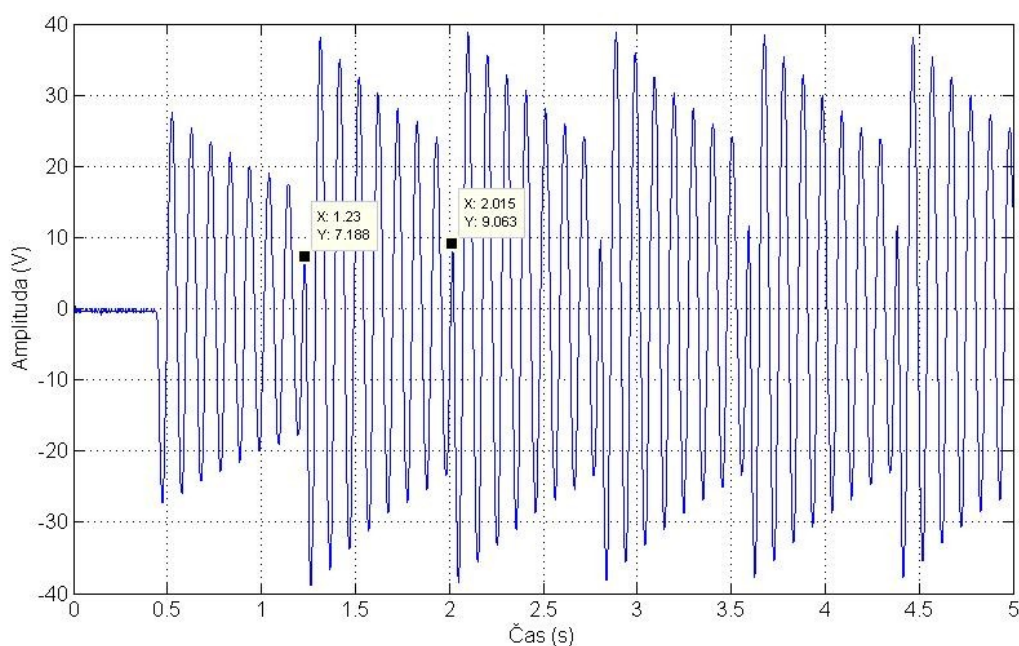
Parametr	Hodnota
Napájecí napětí	2,4 V DC
Otáčky	117 RPM
Krouticí moment	1478 g/cm
Proud	1,134 mA
Průměr	20,4 mm
Délka	49,6 mm

Níže je zjednodušené 3D vyobrazení (Obrázek 21) přesného způsobu dodání pravidelných ohybů piezoměniče. Plastové rameno R připevněné na hřídeli elektromotoru EM s pravidelnou frekvencí ohýbalo konec prodlouženého piezoměniče s celkovou délkou 11,9 cm. Na hrotu piezoměniče byly připevněny dvě závaží z kitu PPA-9001 o celkové hmotnosti m , která byla rovna 11,4 g. Prodloužení a zatížení hrotu piezoměniče bylo provedeno z důvodu naladění, což bylo podrobně vysvětleno v kapitole 5.1.1. V rámci práce se nepodařilo přesně kvantifikovat zrychlení, se kterým je piezoměnič ohýbán, což bývá u aplikací piezoměničů častým a oblíbeným parametrem. Nicméně byl kvantifikován *Ohyb* piezoměniče v mm od klidového stavu, který dosahoval až 1,1 cm. Celková dislokace piezoměniče špička-špička (Peak to Peak Displacement) tudíž dosahovala až 2,2 cm.



Obrázek 21 Zjednodušené 3D vyobrazení pravidelných ohybů piezoměniče

Na obrázku níže (Obrázek 22) lze vidět, že perioda ohybu základny piezoměniče byla 0,755 s. To odpovídá frekvenci otáčení elektrického motoru 1,33 Hz, neboli 79,8 RPM, což bylo méně než uváděl distributor elektromotoru kvůli použití nižšího napájecího napětí, nicméně v konečném důsledku to nemělo na práci vliv.



Obrázek 22 Průběh generovaného střídavého napětí v důsledku pravidelného ohybu piezoměniče

5.3 Harvester energie

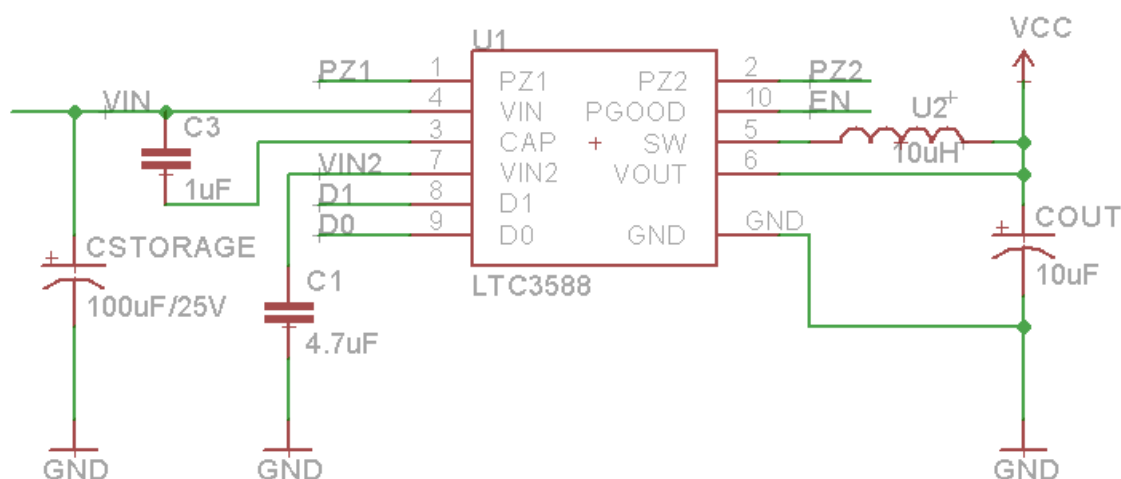
Jako blok, který se stará o usměrnění, uložení a regulaci získaného střídavého napětí z piezoměniče, byla vybrána deska Energy Harvester Breakout - LTC3588 (Sparkfun, Nivot, USA).



Obrázek 23 Deska Energy Harvester Breakout - LTC3588 [24]

Tato deska disponuje harvesterem energie LTC3588 (Linear technology, Milpitas, USA) a umožňuje uživateli snadný přístup k pinům tohoto integrovaného obvodu. Dále deska obsahuje cívku a kondenzátory, které jsou dle technické dokumentace LTC3588 potřebné mezi některými piny harvesteru. Je nutno podotknout, že deska neobsahuje energetické úložiště (Obrázek 24 – „CSTORAGE“), které si uživatel volí sám. Schéma desky, které lze nalézt na další straně (Obrázek 24), je tedy upravené přidáním zmíněného energetického úložiště.

Obecně se volí kapacita energetického úložiště co největší – minimálně 1 mF (tzv. superkapacitor), nicméně v případě této práce byl zvolen elektrolytický kondenzátor o kapacitě 100 μ F. Tato volba padla nejen z důvodu časové náročnosti nabíjení velkých elektrolytických kondenzátorů, jež nebyla vzhledem k počtu měření vhodná, ale také z důvodu celkového účelu práce.



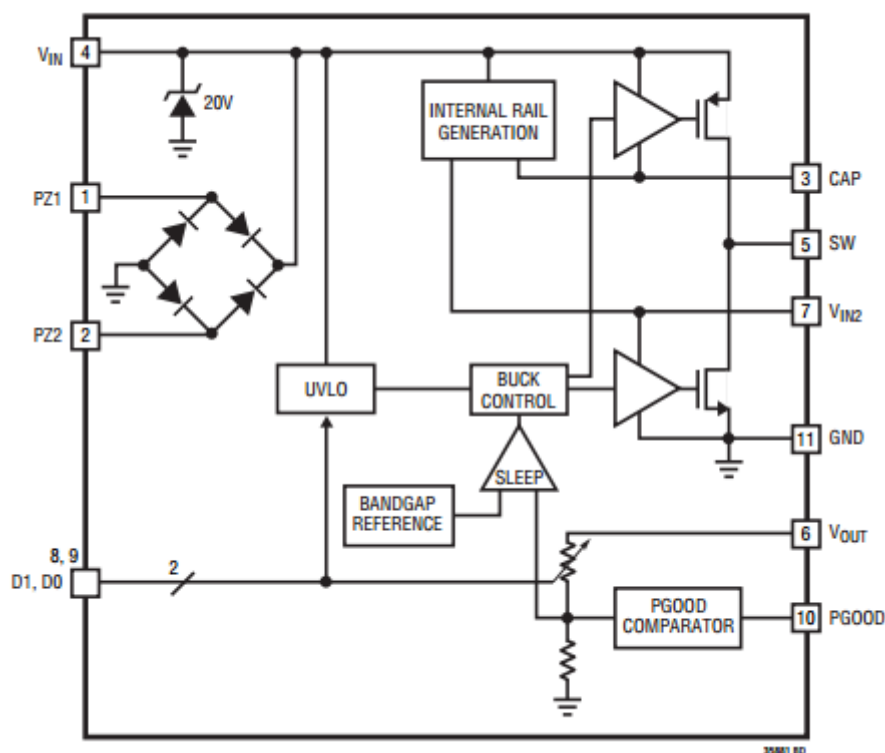
Obrázek 24 Elektrické schéma desky Energy Harvester Breakout - LTC3588, převzato a upraveno z [24]

5.3.1 LTC3588

LTC3588 je harvester energie, který funguje v podstatě jako zdroj energie pracující s velice nízkým klidovým proudem. Je navržen speciálně pro aplikace, kde se využívá získávání energie z prostředí nebo jiné low-power aplikace. Obsahuje nízko ztrátový můstkový usměrňovač a vysoce účinný DC/DC měnič – snižovač napětí. Další výhodou je velký rozsah vstupního napětí – až 20 V. Proto je obvod navíc opatřen uzemněním, které chrání před vstupním napětím větším než 20 V. Obvod má navíc dva vstupy D0 a D1, které umožňují nastavit hodnotu výstupního napětí na 1,8 V, 2,5 V, 3,3 V nebo 3,6 V. Blokový diagram LTC3588 je na další straně (Obrázek 25).

5.3.1.1 Princip funkce

Na vstupy PZ1 a PZ2 je přivedeno střídavé napětí z piezoměniče, které je následně usměrněno můstkovým usměrňovačem. Toto usměrněné napětí je přivedeno na energetické úložiště kde se ukládá elektrický náboj. V momentě, kdy napětí na energetickém úložišti překročí určité prahové napětí (pro výstup 3,3 V je to typicky $U_{UVLORISING}=5,05$ V a pro výstup 1,8 V je to typicky $U_{UVLORISING}=4,04$ V), dojde k aktivaci samotného DC/DC měniče, který začne převádět vstupní napětí z energetického úložiště na stabilní hodnotu napětí na výstupu (výstupním kondenzátoru). DC/DC měnič tedy nabije výstupní kondenzátor přes cívku na hodnotu, která je o něco větší než požadovaná hodnota. Poté se DC/DC měnič uvede do úsporného režimu, přičemž stále monitoruje výstupní napětí pomocí komparátoru. Pokud výstupní napětí spadne pod požadovanou hodnotu, snižovač napětí se aktivuje a cyklus se opakuje. Pokud ovšem kdykoli napětí na energetickém úložišti klesne pod určitou mez (pro výstup 3,3 V je to typicky $U_{UVLOFALLING}=3,67$ V a pro výstup 1,8 V je to typicky $U_{UVLOFALLING}=2,87$ V), tak se DC/DC měnič úplně vypne. Díky tomuto principu funkce je zaručen minimální unikající klidový proud DC/DC měniče i harvesteru jako takového.[23]



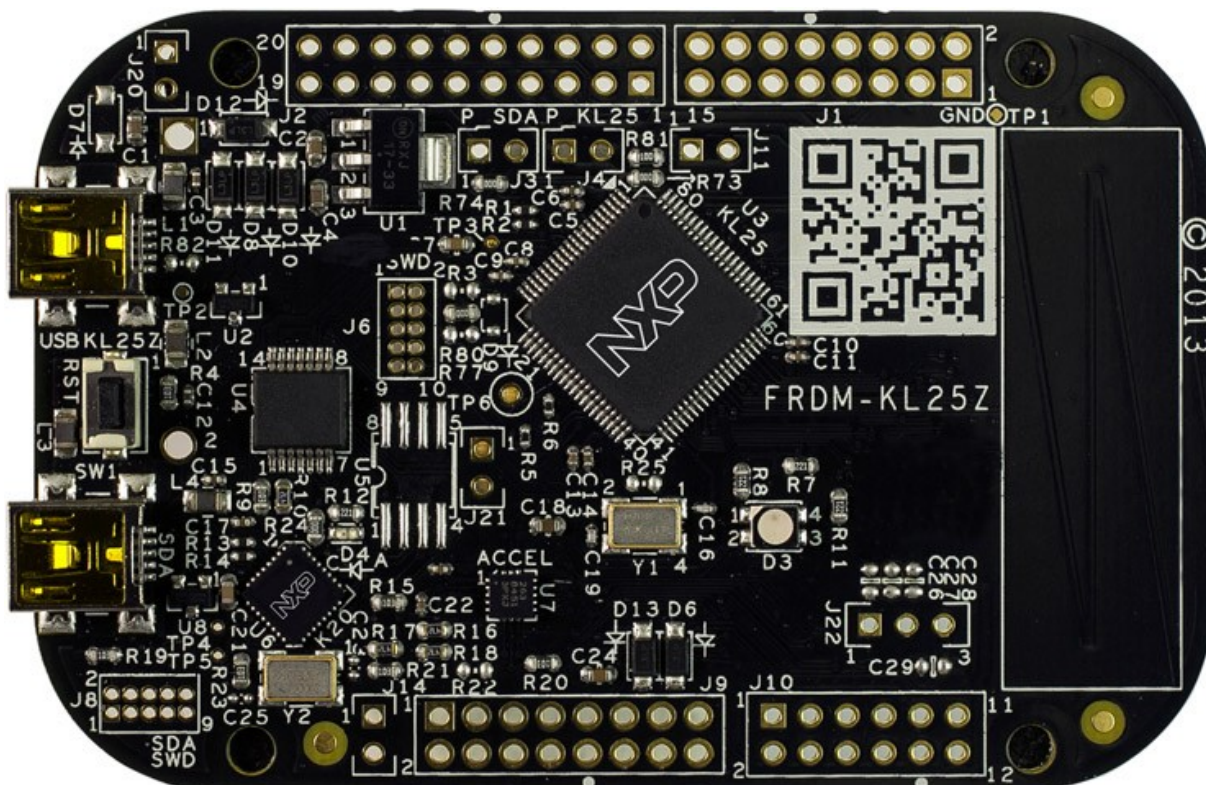
Obrázek 25 Blokový diagram LTC3588 [23]

5.4 Vývojová platforma FRDM KL25Z

Jako zařízení vykonávající užitečné instrukce a napájené pomocí navrhnutého hybridního bez-bateriového konceptu, byla vybrána vývojová platforma FRDM KL25Z (NXP, Eindhoven, Nizozemsko).

Hlavním komponentem této velmi levné platformy je mikrokontrolér Kinetis[®] L Series KL25, který zahrnuje např.: [17][25]

- 32-bitový ARM Cortex-M0+ procesor s max. pracovní frekvencí 48MHz
- 128 KB Flash a 16 KB SRAM paměť
- Široký rozsah napájecího napětí 1,71 V až 3,6 V s plně funkčními Flash operacemi
- Debugovací rozhraní s otevřeným standardem OpenSDA
- Snadný přístup k I/O pinům
- Několik flexibilních low-power módů, umožňující vypnutí hodinového signálu procesoru i sběrnice, přičemž periferie s asynchronním zdrojem hodinového signálu mohou dále fungovat
- Řada periferií – UART, SPI, I2C, ADC, DAC, TPM, LPTMR atd. schopná asynchronní operace v low-power režimech
- Kapacitní dotykový snímač (TSI)
- Vstupně výstupní brána (GPIO) s možností generování přerušení



Obrázek 26 Vývojová platforma FRDM KL25Z [26]

Z důvodu nízké ceny a podpory low-power či dokonce ultra low-power režimů byla tato vývojová platforma vybrána jako poslední prvek navrhnutého hybridního konceptu napájení. FRDM KL25Z však při standardní konfiguraci odebírá proud v řádu desítek mA, proto bylo nutné provést hardwarové úpravy platformy a poté softwarové nastavení mikrokontroléru KL25 tak, aby se zařízení dostalo na spotřebu v řádech desítek či maximálně stovek μA . Těmito úpravami se podařilo uvést zařízení do potřebného low-power stavu, přičemž jednotlivé úpravy jsou popsány v podkapitolách 5.4.1a 5.4.2.

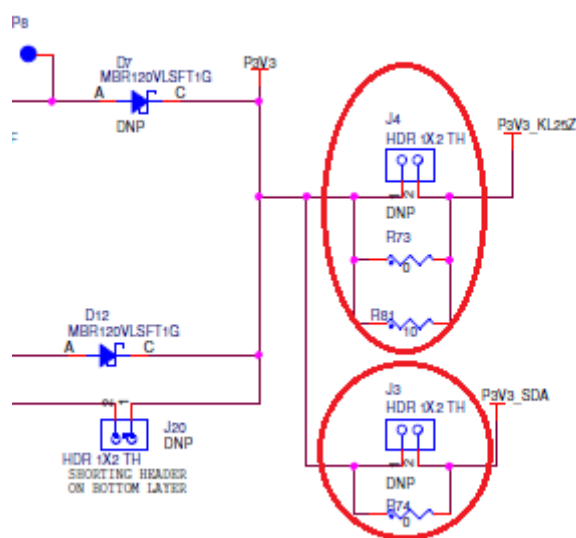
Dalším úkolem bylo vytvoření programových instrukcí (programu) v jazyce C, které mikrokontrolér vykonával, čímž simuloval činnost jakékoliv jiného low-power zařízení, které by mohlo být napájeno navrženým hybridním bez-bateriovým konceptem. Softwarová implementace i se stavovým automatem je detailně popsána v podkapitole 5.4.3.

Kinetis SDK 2.0 projekt s vypracovaným kódem veškerých instrukcí pro softwarové nastavení mikrokontroléru a implementaci programu i s použitými ovladači je v příloze na CD (Příloha IV).

5.4.1 Hardwarové úpravy platformy FRDM KL25Z

5.4.1.1 Měření proudové spotřeby

Na platformě existují dva headery, na kterých je možné měřit spotřebu proudu samotného mikrokontroléru KL25 a debugovacího rozhraní OpenSDA. Header J4 umožňuje měřit proudový odběr mikrokontroléru KL25 a J3 odběr debugovacího rozhraní OpenSDA. Aby bylo možno na těchto místech měřit, musely být odstraněny odpory R_{73} , R_{74} a R_{80} . Třetím proudem, který byl v průběhu úprav měřen, byl celkový proud platformy, kdy byl ampérmetr zařazen od série před platformu. Headery byly v případě potřeby vodivosti cesty (např. OpenSDA při debugu) spojeny zkratovacími propojkami.



Obrázek 27 Hardwarové úpravy platformy pro měření proudového odběru [27]

Na začátku, kdy bylo zařízení po resetu v módu hodinových signálů FEI, a nevykonávalo žádné instrukce, respektive program byl pouze uzavřen v nekonečném cyklu, aby neopustil hlavní funkci, se tedy proudové odběry pohybovaly v jednotkách a desítkách mA (Tabulka 5).

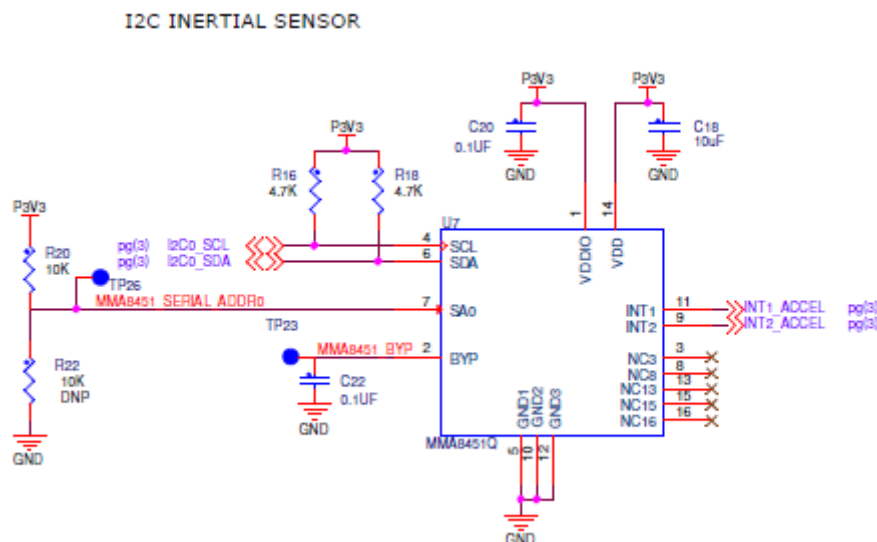
Tabulka 5 Proudové odběry na začátku úprav

Proud KL25	3,27 mA
Proud OpenSDA	6,65 mA
Proud celé platformy	13,44 mA

Pro napájení platformy byl využit pin 8 headeru J9, který je připojen na hlavní napájecí cestu P_{3V3} , jelikož napájecí napětí z harvesteru bylo buď 1,8 V, nebo 3,3 V. Proto byly prostudovány detailní schéma této napájecí cesty P_{3V3} . Veškeré přebytečné moduly či vedlejší cesty na této napájecí větvi byly odstraněny.

5.4.1.2 Odstranění akcelerometru MMA8451Q

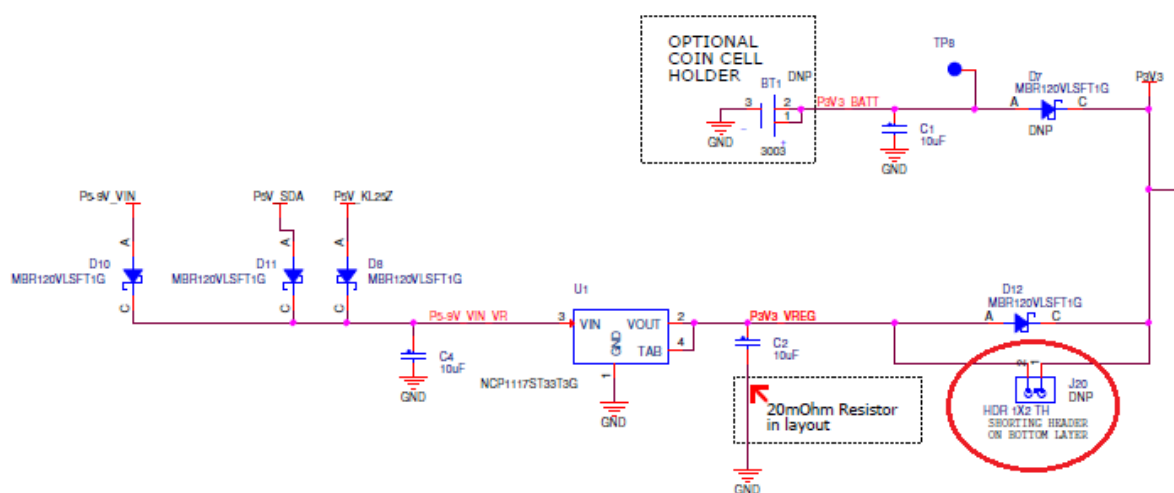
Z platformy byl kompletně odstraněn akcelerometr, čímž ale spotřeba proudu klesla pouze v řádu desítek μA .



Obrázek 28 Akcelerometr MMA8451Q na cestě P_{3v3} [27]

5.4.1.3 Odstranění cesty do napěťového regulátoru přes header J20

Část proudu se z cesty P_{3V3} vrací do napěťového regulátoru na vstupech pro jiné napájecí cesty, tudíž bylo přerušeno vodivé spojení pod headerem J20. Tímto došlo k úspoře proudu celé platformy přibližně o 3,5 mA.



Obrázek 29 Přerušení cesty pod J20

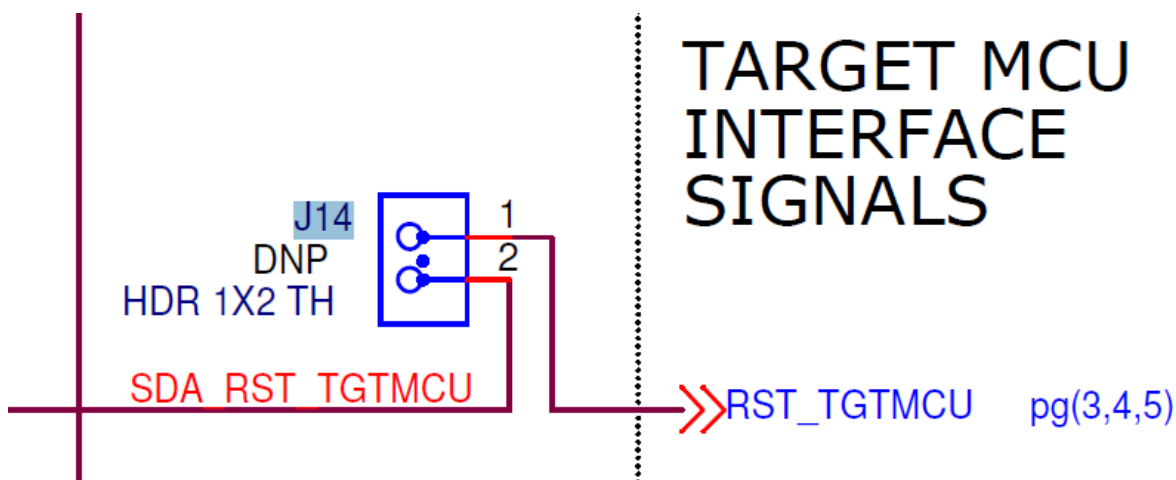
Přerušením cesty pod J20 a odstraněním akcelerometru došlo k přibližnému srovnání celkového proudového odběru platformy se součtem proudových odběrů KL25 a OpenSDA (Tabulka 6).

Tabulka 6 Proudové odběry po přerušení J20 a odstranění akcelerometru

Proud KL25	3,27 mA
Proud OpenSDA	6,65 mA
Proud celé platformy	9,75 mA

5.4.1.4 Odpojení OpenSDA a OpenSDA resetovacích signálů

Posledním krokem v hardwarových úpravách desky bylo odpojení OpenSDA debugovacího rozhraní a resetovacích signálů tohoto rozhraní. Proto byla přerušena vodivá cesta resetovacího signálu pod headerem J14. V případě potřeby debugu byly headery spojeny zkratovacími propojkami.



Obrázek 30 Resetovací signál OpenSDA J14 [27]

Veškerými hardwarovými úpravami bylo při módu hodinových signálů FEI po resetu dosaženo proudových odběrů vypsanych v následující tabulce (Tabulka 7).

Tabulka 7 Proudové odběry po všech hardwarových úpravách

Proud KL25	3,248 mA
Proud celé platformy	3,285 mA

5.4.2 Softwarové nastavení mikrokontroléru KL25

Jedním z hlavních cílů práce bylo nastavení mikrokontroléru tak, aby vykonal instrukce programu co nejrychleji a s co nejmenšími energetickými nároky, a poté aby přešel do úsporného stop módu s naprosto minimální spotřebou. Po určité době dojde k probuzení mikrokontroléru na základě asynchronního přerušení, přičemž mikrokontrolér opět začne vykonávat dané instrukce a poté znova se uspí (nekonečný cyklus).

Jako kompilátor byl použit software Kinetis Design Studio 3.0 společně s rozšiřovacím kitem Kinetis SDK 2.0, přičemž pro debug byl použit program Ozone v2.22.

5.4.2.1 Very Low Power Run (VLPR) mód

Jak už bylo výše zmíněno, vývojová platforma FRDM KL25Z disponuje podporou několika low-power režimů. Režim, který disponuje nejnižší spotřebou v době, kdy mikrokontrolér vykonává instrukce (RUN), je tzv. Very Low Power Run (VLPR) mód. [17]

Pro vstup do tohoto módu je nejprve nutné nastavení hodinových signálů mikrokontroléru do správných mezí, což umožňují registry v modulu MCG (Multipurpose Clock Generator). V tomto modulu byl proto nejprve nastaven BLPI (Bypassed Low Power Internal) mód hodinových signálů. Jako zdroj hodinového signálu pro procesor může být v módu BLPI použit pouze rychlý vnitřní referenční hodinový signál s maximální frekvencí 4MHz, nebo vnitřní pomalý referenční hodinový signál s frekvencí 32 KHz. Pomalý referenční hodinový signál však nemůže být použit pro vstup do VLPR módu, proto byl zvolen rychlý referenční hodinový signál. Hodinový signál sběrnice a Flash musí být dále snížen na alespoň 0,8 MHz. Na základě obrázku č. 4 v [25] byl pro dosažení absolutně nejnižší spotřeby ve VLPR nastaven poměr frekvence jádra k frekvenci sběrnice/Flash 2:1. Frekvence jádra byla dále nastavena na 1 MHz a frekvence sběrnice/flash na 0,5 MHz. K finálnímu povolení vstupu do VLPR módu byly nakonfigurovány registry v modulu SMC (System Mode Controller).

5.4.2.2 Very Low Power Stop (VLPS) mód

Vývojová platforma FRDM KL25Z nabízí také řadu úsporných stop módů, během kterých je mikrokontrolér uveden do úsporného režimu (uspán), což znamená, že je dočasně vypnuta většina hodinových signálů (procesoru, sběrnice, flash atd. i většiny periférií). Nicméně některé periferie s asynchronním hodinovým signálem mohou fungovat i po dobu, kdy je mikrokontrolér uspán.[17]

Z řady nabízených stop módů byl vybrán VLPS mód z následujících důvodů:[17]

- Metoda probuzení je čistě přerušení
- Jako jediný ze stop módů přechází po probuzení rovnou do VLPR módu a ne do normálního RUN módu
- Veškerá SRAM paměť je dále napájena (data nejsou ztracena)
- I/O stavy jsou drženy
- Kompatibilita tohoto módu s debugem

Ke generaci přerušení byl použit časovač LPTMR (Low Power Timer), jehož asynchronním zdrojem hodinového signálu byl LPO (Low Power Oscillator). Pro finální vstup do VLPS byly opět nakonfigurovány registry v modulu SMC (System Mode Controller).

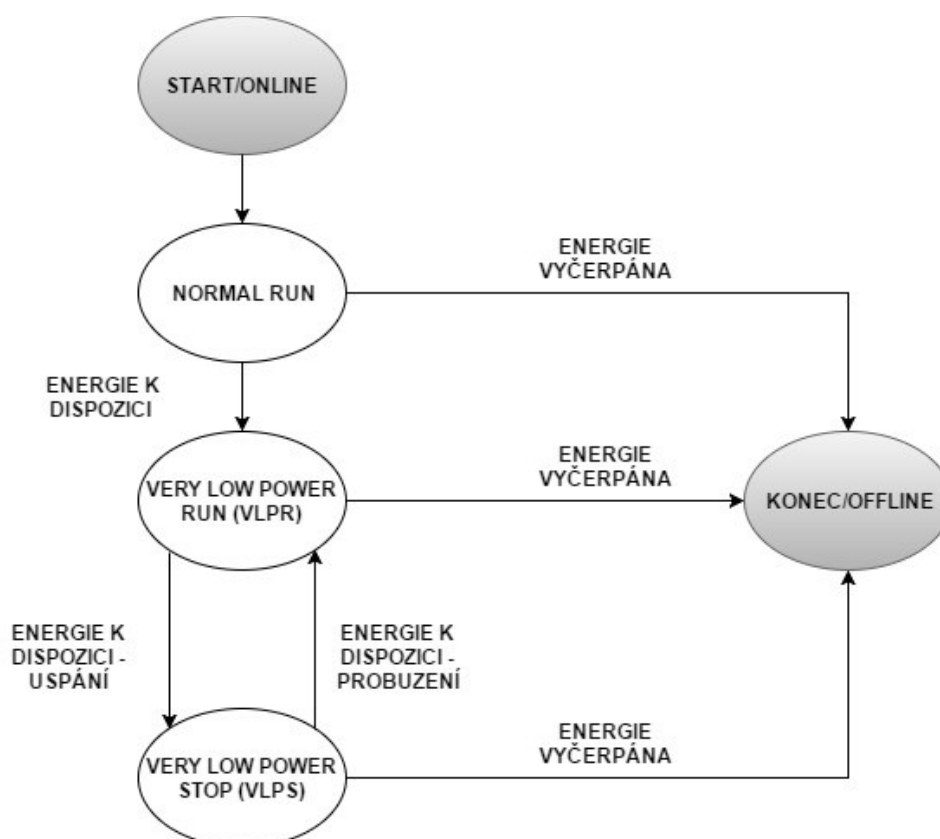
Po softwarovém nastavení VLPR a VLPS módů došlo ke značnému snížení odběru proudu, čímž byla platforma připravena reprezentovat low-power zařízení. V tabulce (Tabulka 8) níže lze vidět hodnoty proudové spotřeby v jednotlivých módech před implementací programu (MCU ve VLPR módu nevykonával žádné instrukce). Navíc ještě následující hodnoty proudu odpovídají stavu, kdy jsou vypnuty veškeré hodinové signály periférií, kromě časovače LPTMR.

Tabulka 8 Výchozí proudové odběry po veškerých hardwarových a softwarových úpravách

Proud KL25 ve VLPR módu	106,8 μ A
Proud celé platformy ve VLPR módu	119,1 μ A
Proud KL25 ve VLPS módu	3,1 μ A
Proud celé platformy ve VLPS módu	15,3 μ A

5.4.2.3 Stavový automat

Na obrázku (Obrázek 31) níže je stavový diagram platformy FRDM KL25Z. Při připojení napájecího napětí (zařízení je online) se mikrokontrolér (jako ostatně po každém resetu) dostane do normálního módu operace (NORMAL RUN). Následně je mikrokontrolér okamžitě uveden do VLPR módu, ve kterém provádí veškeré programové instrukce. V momentě, kdy dokončí instrukce, přejde mikrokontrolér do VLPS módu, ve kterém zůstane, dokud nepřijde přerušení z časovače (LMPTR). Mikrokontrolér poté přechází pouze mezi dvěma stavy – VLPR a VLPS, ale to jen pokud je na energetickém úložišti dostatek energie a harvester je tedy schopen dodávat napájecí napětí. Pokud je kdykoli v průběhu energie na úložišti vyčerpána pod určitou mez, nebo pokud dojde k odpojení napájecího napětí, tak platforma přestane být napájena z harvesteru a je vypnuta (offline) a to nezávisle na stavu, ve kterém se zrovna nachází. Přechod do stavu konec/offline není tak úplně programový přechod, nicméně pro úplnost byl do schématu přidán. Navrhovaný koncept je tudíž opravdu bez-bateriový a bez jakéhokoliv záložního zdroje.



Obrázek 31 Stavový automat mikrokontroléru

5.4.3 Implementace programu

Aby bylo možné posoudit návrh hybridního konceptu napájení, musela platforma FRDM KL25Z vykonávat reálné užitečné instrukce, které zatíží mikrokontrolér. Až poté bylo možno vyhodnotit účinnost a efektivitu návrhu v závislosti na energetické spotřebě platformy.

Pro simulaci reálného low-power zařízení byl vytvořen následující sled programových instrukcí (viz schéma (Příloha II)). Nejprve je mikrokontrolér KL25 uveden do VLPR módu. Následně vstupuje program do nekonečného cyklu. V něm jsou prvně zapnuty hodinové signály používaných periférií – kapacitního snímače (TSI), časovače (LPTMR) a portu B. Poté je na pin PTB0 přivedeno napětí signalizující počátek počítání užitečných instrukcí. Tento flag je používán pro ověření při měření v kapitole 6.

Dalším krokem programu byla alespoň částečná simulace práce např. nějakého senzoru, kdy bylo naměřeno 256 hodnot kapacitního snímače (TSI), přičemž tato data byla dále použita jako vstupní data pro FIR filtr. Proces počítání tohoto filtru představoval hlavní zatížení mikrokontroléru. Jednalo se o FIR filtr sedmého řádu typu dolní propust. Po vypočtení výstupu FIR filtru bylo výsledné pole hodnot uloženo do 2D pole ve SRAM paměti, ale to pouze pokud bylo celkově vykonáno pouze maximálně 5 cyklů počítání FIR filtru. Toto opatření bylo nutné z důvodu omezené kapacity SRAM paměti.

Po tomto kroku bylo odpojeno napětí na pinu PTB0, což signalizovalo konec užitečných instrukcí. Následně je inicializován časovač LPTMR, který je nastaven tak, aby po 4 vteřinách vygeneroval vnitřní přerušení. Po inicializaci časovače je mikrokontrolér okamžitě uveden do VLPS úsporného módu (uspán), a probuzen je právě po 4 vteřinách, kdy je v obslužné rutině přerušení vymazán flag přerušení. Program se tak vrací na začátek k zapnutí hodinových signálů do periférií, jejichž hodinové signály byly po dobu VLPS módu s výjimkou časovače vypnuty.

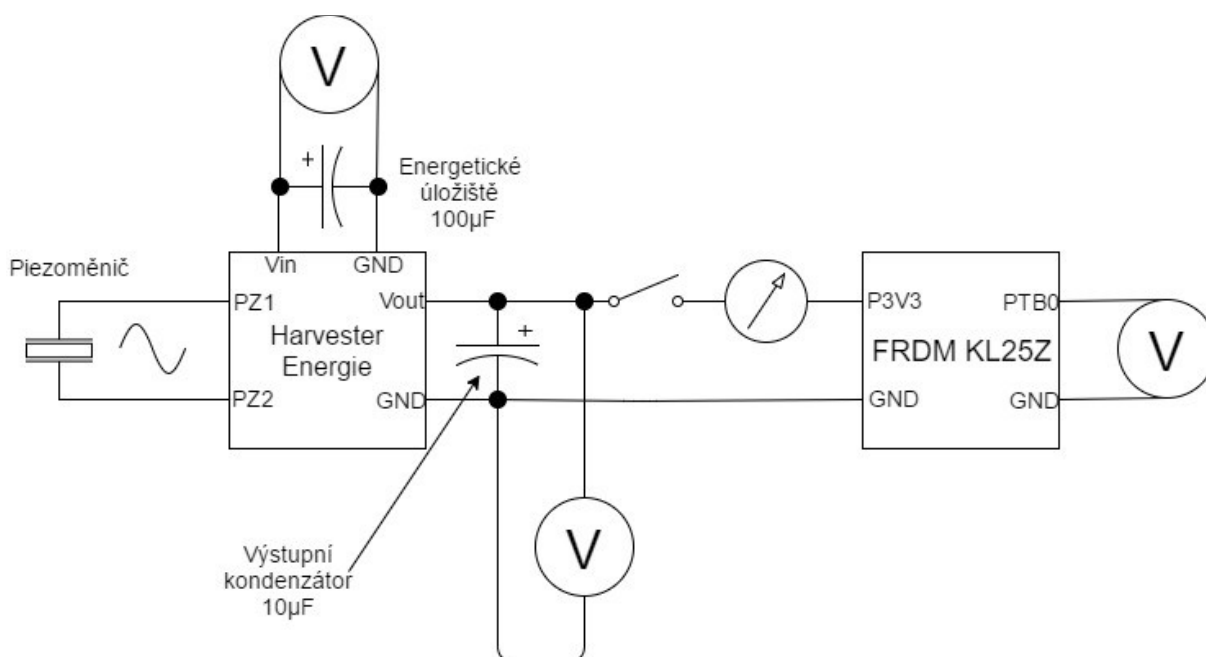
6 Testování návrhu

Aby bylo možné vyhodnotit navržený hybridní koncept napájení z hlediska získané energie, spotřeby, spolehlivosti a účinnosti, byl návrh podroben testování, které zahrnovalo následující měření:

- proud platformy FRDM KL25Z
- napětí energetického úložiště
- napětí výstupního kondenzátoru, což je výstupní napětí harvesteru pro napájení platformy
- napětí flagu počítání FIR filtru PTB0

K měření proudu platformy byl použit pikoampérmetr Keithley 6485 (Keithley Instruments, Cleaveland, USA), jenž disponoval analogovým napěťovým výstupem, který podle zvoleného rozsahu úměrně odpovídal okamžité hodnotě měřeného proudu. Tento analogový výstup pikoampérmetru byl připojen na jeden kanál 4 kanálového osciloskopu MSO7104A (Keysight technologies, Santa Rosa, USA). Na zbylé tři kanály byly připojeny výše zmíněné měření napětí.

Blokové schéma použitého měřicího řetězce: (Obrázek 32)



Obrázek 32 Blokové schéma měřicího řetězce

Jak bylo řečeno v kapitole 5.3.1, harvester má 4 volitelné hodnoty výstupního napětí – napětí na výstupním kondenzátoru, které slouží jako stabilní napájecí napětí pro platformu FRDM KL25Z. Jednou z výhod mikrokontroléru KL25 je široký a plnohodnotný rozsah napájecího napětí 1,71 V až 3,6 V. Z teorie v kapitole 3.2.3 vyplývá, že pokud snížíme napájecí napětí, dojde ke snížení dynamické spotřeby energie. Na druhou stranu ale z technické dokumentace harvesteru ([23]) vyplývá, že se snižující se hodnotou výstupního napětí harvesteru se snižuje i účinnost DC/DC měniče tohoto harvesteru (klesá efektivita, se kterou je DC/DC měnič schopen převádět energii z úložiště na výstup

harvesteru). Navíc se obecně účinnost DC/DC měniče snižuje se zvyšujícím se napětím na energetickém úložišti. Při měření tedy byl brán v potaz vliv těchto protichůdných předpokladů, a proto byla provedena měření zvlášť pro výstupní napětí harvesteru 1,8 V a 3,3 V.

6.1 Postup měření

Pro obě zvolené hodnoty výstupního napětí harvesteru (1,8 V a 3,3 V) byl dodržován stejný postup měření a totožný měřicí řetězec. Nejdříve bylo energetické úložiště nabito na přibližně 15 V pomocí kinetické energie ramene elektromotoru, ukotveného ve fixované pozici v laboratorním stojanu. Ohýbáním piezoměniče a následným usměrněním vzniklého střídavého napětí byla na energetickém úložišti naakumulována energie. Poté byl elektromotor zastaven a příchod kinetické energie ohýbající piezoměnič ustal. Energie na úložišti tak dosáhla určité základní výchozí hodnoty (přibližně 11,25 mJ), jež je vtažena k napětí na úložišti podle vzorce 6.1. Následně byl zapnut spínač za výstupním kondenzátorem harvesteru, čímž se zapojila zátěž v podobě platformy FRDM KL25Z. V ten moment bylo spuštěno měření proudu a napětí, záznam byl uložen a později zpracován pro výpočty doby chodu platformy, spotřeby, výkonu, ztracené energie a celkové účinnosti. Měření probíhalo až do doby, kdy došlo k vyčerpání energie z úložiště pod takovou mez, že DC/DC měnič harvesteru přestal pracovat, čímž na jeho výstupu přestalo existovat napájecí napětí pro platformu FRDM KL25Z. Tento proces byl opakován desetkrát pro obě zvolené výstupní hodnoty harvesteru, přičemž měření byla statisticky zpracována.

Pro větší přehlednost byl postup měření zpracován i do blokového schématu (viz Příloha III).

6.2 Získaná energie

První fází měření tedy byl zisk energie a uložení na energetické úložiště. Energii uloženou na kondenzátoru lze obecně stanovit z následující rovnice [21]:

$$E = \frac{1}{2} C U^2 \quad (6.1)$$

Ze vztahu 6.1 je zřejmé, že energie stoupá se čtvercem napětí. Pro energii úložiště platilo:

$$E_{\text{úlož}} = \frac{1}{2} C_{\text{úlož}} (U_{\text{úlož}})^2 \quad (6.2)$$

Do výpočtu celkové energie k dispozici (6.3) však byla započtena i energie výstupního kondenzátoru. S touto energií, ať už je vzhledem k energii na úložišti sebezanedbatelnější (kvůli nižšímu napětí a nižší kapacitě), se počítalo, jelikož ji platforma FRDM KL25Z po sepnutí spínače spotřebovala v podstatě jako první.

$$E_{\text{celková}} = E_{\text{úlož}} + E_{\text{výst}} = \frac{1}{2} C_{\text{úlož}} (U_{\text{úlož}})^2 + \frac{1}{2} C_{\text{výst}} (U_{\text{výst}})^2 \quad (6.3)$$

Kde:

$E_{\text{celková}}$...celková energie k dispozici (J)

$E_{\text{úlož}}$...energie na úložišti (J)

$E_{\text{výst}}$... energie na výstupním kondenzátoru (J)

$C_{\text{úlož}}$...kapacita úložiště – 100 uF

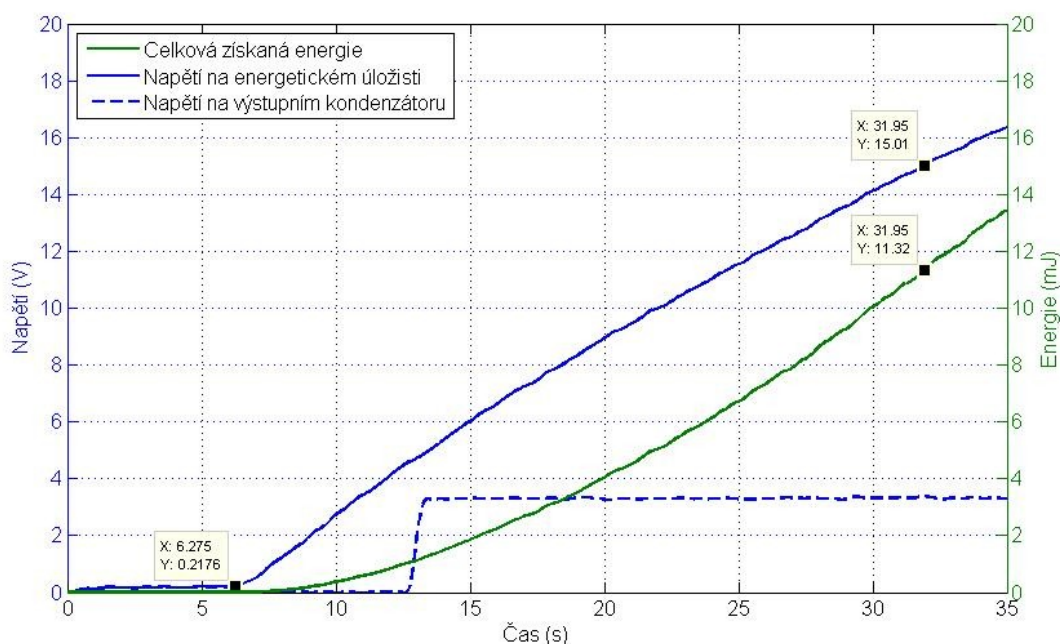
$U_{\text{úlož}}$...napětí na kondenzátoru (V)

$C_{\text{výst}}$...kapacita výstupního kondenzátoru – 10 uF

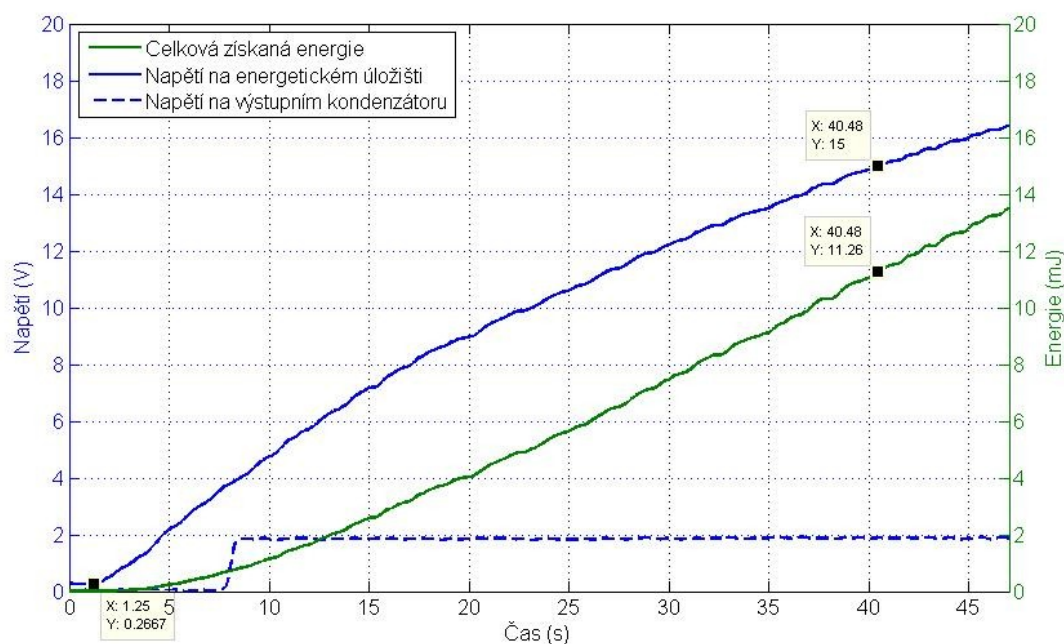
$U_{\text{výst}}$...napětí na výstupním kondenzátoru – 3,3 V nebo 1,8 V

Na grafu níže (Graf 1) lze vidět typický průběh nabíjení energetického úložiště a výstupního kondenzátoru harvesteru pro výstupní napětí 3,3 V. Nastavené výstupní napětí harvesteru se na výstupním kondenzátoru objeví v momentě, kdy je překročena určitá mez na energetickém úložišti, viz princip funkce v kapitole 5.3.1. Na pravé y ose je vynesena celková dostupná energie v čase, která při nabití energetického úložiště na 15 V dosahovala 11,32 mJ nebo 11,26 mJ, podle nastaveného výstupního napětí harvesteru. 99% této celkové energie – konkrétně 11,25 mJ bylo uloženo na energetickém úložišti, proto je v práci brána hodnota energie 11,25 mJ jako přibližná výchozí hodnota energie po nabití. K nabití energetického úložiště pomocí ohybů piezoměniče ramenem elektromotoru došlo přibližně za 25 sekund. Z průběhu napětí na energetickém úložišti lze usoudit, že nabíjení není úplně lineární. K nejrychlejšímu nárustu napětí na energetickém úložišti při nabíjení docházelo v prvních sekundách. Předkročením zmiňované meze napětí na energetickém úložišti byl aktivován DC/DC měnič, jehož účinnost převádění napětí na výstupní kondenzátor klesá s rostoucím napětím na energetickém úložišti, což mohlo být jednou z příčin nelinearity.

U typického průběhu nabíjení energetického úložiště a výstupního kondenzátoru harvesteru pro výstupní napětí 1,8 V (Graf 2) je vliv nelinearity ještě větší. Nabíjení energetického úložiště při výstupním napětí harvesteru 1,8 V tak typicky trvalo delší dobu a to přibližně 39 sekund.

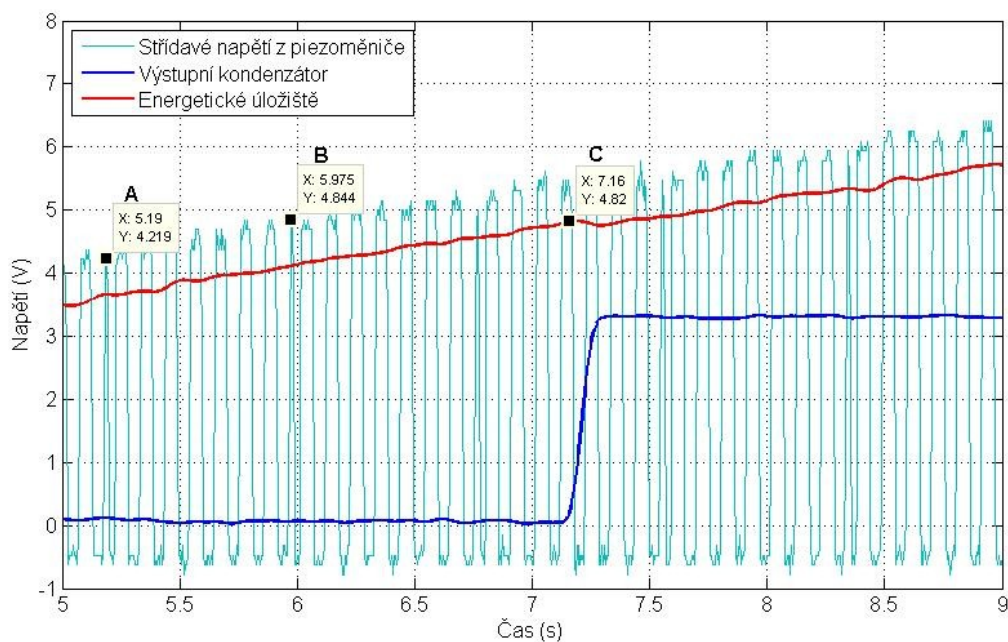


Graf 1 Typický průběh nabíjení energetického úložiště při výstupním napětí harvesteru 3,3 V



Graf 2 Typický průběh nabíjení energetického úložiště při výstupním napětí harvesteru 1,8 V

Na následujícím grafu (Graf 3) je detailní přiblížení průběhu nabíjení při výstupním napětí 3,3 V i s průběhem střídavého napětí z piezoměniče. V přibližně lineární fázi, tedy před překročením meze (bod C) pro zapnutí DC/DC měniče harvesteru, lze odečíst, že jedním ohybem piezoměniče se zvedlo napětí na energetickém úložišti o přibližně 0,625 V (body A a B). Tento přírůstek napětí odpovídal v tomto případě (z bodu A do bodu B) přírůstku energie přibližně 0,25 mJ.



Graf 3 Přiblížení průběhu nabíjení úložiště při výstupním napětí 3,3 V

6.3 Spotřeba proudu, výkon, energie a účinnost návrhu

Všechny měřené průběhy na 4 kanálovém osciloskopu byly zatíženy šumem, a to i přesto, že byl osciloskop napájen ze sítě přes oddělovací transformátor. Nejvíce byl rušen průběh proudu z analogového výstupu pikoampérmetru, kdy byl tento v podstatě normálně obdélníkový průběh (vysoké hodnoty při VLPR a nízké při VLPS) zatížen rušivými špičkovými signály. Na tomto průběhu proudu se výrazně podepsala absence Faradayovy klece, která je velmi vhodná při měření takto malých proudů v řádu desítek či stovek μA . Dalším důvodem může být použití velké časové osy u osciloskopu.

Všechny naměřené průběhy byly zpracovány v prostředí Matlab. Nejprve byl proveden převod průběhů z časové oblasti do frekvenční oblasti pomocí rychlé Fourierovy transformace (FFT), čímž byly zjištěny dominantní rušivé frekvence signálu. Následně byly signály vyfiltrovány pomocí zabudovaného číslicového FIR filtru 16. řádu, nastaveného jako dolní propust. Tím byly průběhy vyhlazeny, díky čemuž zejména průběh proudu korespondoval s hodnotami měřenými na číselném displeji pikoampérmetru, ale došlo k mírnému zjemnění náběžných a sestupných hran těchto průběhů. Dále se na grafech projevilo mírné zkreslení první náběžné a poslední sestupné hrany proudu. První náběžná hrana je mírně zpožděná za napětovým průběhem flagu (viz např. Graf 4), zatímco poslední sestupná je mírně zrychlená. To bylo pravděpodobně způsobeno samotným měřítkem analogového výstupu pikoampérmetru, který při nulovém (nebo záporném) proudu vykresloval záporné hodnoty napětí. Přechod vykreslování přes několik napětových hladin (1 V/dílek) v kombinaci s velkou časovou osou osciloskopu pravděpodobně byly faktory způsobující tento jev.

Z důvodu zarušení průběhů a nutné číslicové filtrace bylo pro obě výstupní napětí harvesteru provedeno 10 měření, z nichž byly vypočteny střední hodnoty naměřených a vypočtených hodnot proudu, energií, výkonu a účinnosti. V rámci měření byly zpracovány tyto veličiny:

I_{RUN} (mA):

Průměrný proud platformy FRDM KL25Z v době, kdy byl mikrokontrolér aktivní (RUN), přesněji v módu VLPR. Tato aktivní doba mikrokontroléru jednoho cyklu byla pro obě výstupní napětí harvesteru stejná a to přibližně 900 ms.

I_{SLEEP} (mA):

Průměrný proud platformy FRDM KL25Z v době, kdy byl mikrokontrolér uspán (SLEEP), přesněji v módu VLPS. Tato pasivní doba mikrokontroléru jednoho cyklu byla opět pro obě výstupní napětí harvesteru stejná a to 4 vteřiny.

$I_{\text{PRŮM}}$ (mA):

Celkový průměrný proud platformy FRDM KL25Z z celé doby chodu mikrokontroléru, dokud nebyla vyčerpána energie a tím i odpojeno napájecí napětí (výstupní napětí harvesteru).

P_{PRŮM} (mW):

Celková průměrná hodnota výkonu platformy FRDM KL25Z z celé doby chodu mikrokontroléru. Je to součin celkového průměrného proudu a nastaveného výstupního napětí harvesteru.

$$P_{PRŮM} = I_{PRŮM} \cdot U_{výst} \quad (6.4)$$

Doba chodu (s):

Čas, po který byla platforma FRDM KL25Z napájena, než byla vyčerpána energie a tím odpojeno napájecí napětí (výstupní napětí harvesteru). Jinými slovy to byl i čas každého měření.

E_{SPOTŘEBOVANÁ} (mJ):

Celková energie reálně spotřebovaná platformou FRDM KL25Z za dobu chodu.

$$E_{SPOTŘEBOVANÁ} = P_{PRŮM} \cdot \text{doba chodu} \quad (6.5)$$

E_{ZBYLÁ} (mJ):

Energie na energetickém úložišti, která tam po měření zbyla nevyužitá proto, že napětí na energetickém úložišti kleslo pod určitou mez, která se liší pro obě nastavené výstupní napětí harvesteru ($U_{UVLOFALLING}$), viz kapitola 5.3.1. Poklesem pod tuto mez byl vypnut DC/DC měnič a napájecí napětí na výstupu harvesteru přestalo existovat.

$$E_{ZBYLÁ} = \frac{1}{2} C_{úlož} (U_{UVLOFALLING})^2 \quad (6.6)$$

E_{CELKOVÁ} (mJ):

Výchozí energie, která byla k dispozici na začátku měření. Jedná se o energii na energetickém úložišti a výstupním kondenzátoru harvesteru. Výpočet této energie viz začátek kapitoly 6.2. Tato energie se při každém měření mírně lišila a to z důvodu nepřesného manuálního sepnutí spínače pro zapojení platformy FRDM KL25Z do obvodu (start měření). Jinými slovy nepodařilo se pokaždé manuálně sepnout obvod úplně přesně v okamžiku při nabití energetického úložiště na 15 V.

E_{ZTRACENÁ} (mJ):

Ztracená energie je energie, která byla spotřebována harvesterem za dobu chodu, konkrétně DC/DC měničem při své činnosti. Jedná se o následující rozdíl energií:

$$E_{ZTRACENÁ} = E_{CELKOVÁ} - E_{SPOTŘEBOVANÁ} - E_{ZBYLÁ} \quad (6.7)$$

Účinnost η (%):

Účinnost DC/DC měniče se zvyšuje se snižujícím se napětím na energetickém úložišti, nicméně v této práci je účinnost myšlena jako účinnost harvesteru za proces celého jednoho měření (jedné doby chodu). Je to podíl energie, která byla spotřebována platformou FRDM KL25Z za dobu chodu, a součtu této energie s energií ztracenou za dobu chodu.

$$\eta_{CELKOVÁ} = \frac{E_{SPOTŘEBOVANÁ}}{E_{SPOTŘEBOVANÁ} + E_{ZTRACENÁ}} \cdot 100 \quad (6.8)$$

6.3.1 Výsledky při výstupním napětí harvesteru 3,3 V

Tabulka 9 popisuje výsledky měření při tomto výstupním napětí harvesteru. Střední hodnota doby chodu při výchozí celkové dostupné energii přibližně 11,25 mJ byla 15 sekund. Z grafu průběhu naměřených napětí a proudu v čase (Graf 4), lze vyčíst, že mikrokontrolér typicky vykonal programový cyklus celý celkem třikrát, přičemž čtvrtý cyklus byl ukončen zhruba v třech čtvrtinách aktivního počítání FIR filtru. Poté došlo k vyčerpání dostupné energie, respektive k poklesu napětí na energetickém úložišti pod určitou mez, jež znamenala odpojení napájecího napětí pro platformu.

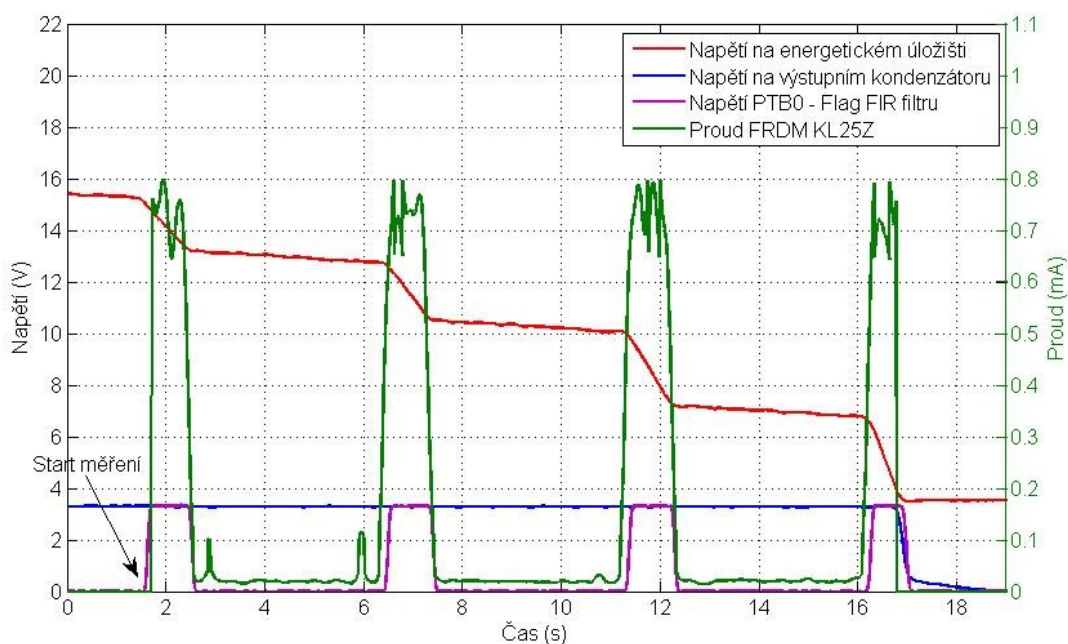
Střední hodnota I_{RUN} byla 0,706 mA, střední hodnota celkového průměrného proudu $I_{PRŮM}$ odpovídala 0,164 mA. Za dobu chodu spotřebovala platforma průměrně energii 8,089 mJ, přičemž bylo za dobu chodu DC/DC měničem ztraceno průměrně 2,450 mJ energie. Průběh závislosti spotřebované energie a celkové energie k dispozici je znázorněn na další straně (Graf 5).

Střední hodnota účinnosti harvesteru při výstupním napětí harvesteru 3,3 V byla poměrně vysoká, a to 76,75 %.

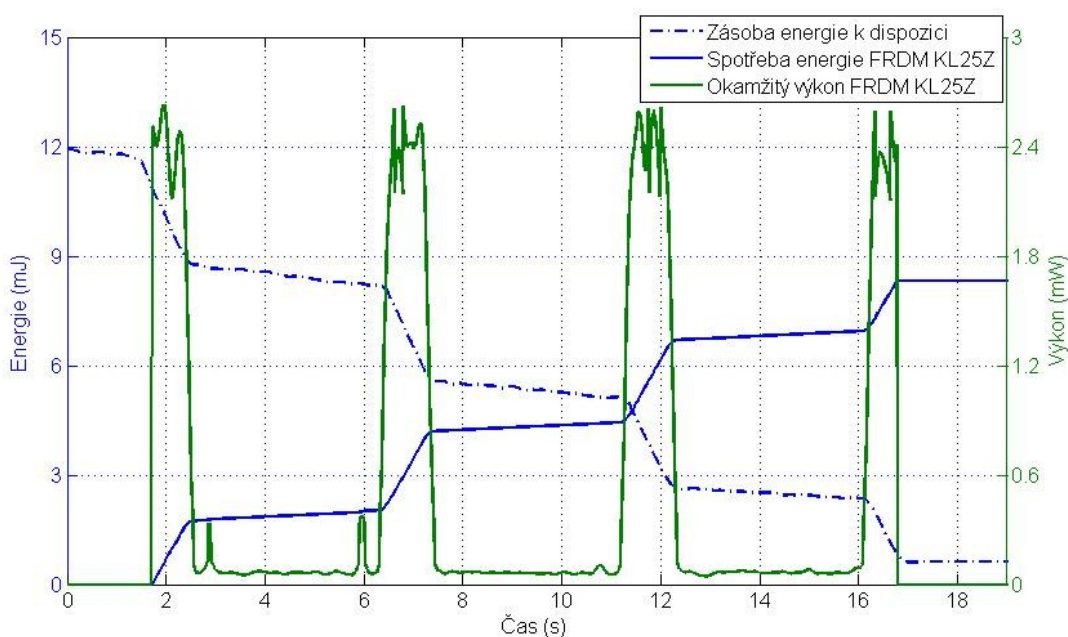
Tabulka 9 Naměřené a vypočtené hodnoty pro měření při výstupním napětí harvesteru 3,3 V

č. měření	I_{RUN} (mA)	I_{SLEEP} (mA)	$I_{PRŮM}$ (mA)	$P_{PRŮM}$ (mW)	Doba chodu (s)	$E_{SPOTŘEBOVANÁ}$ (mJ)	$E_{ZBYLÁ}$ (mJ)	$E_{CELKOVÁ}$ (mJ)	$E_{ZTRACENÁ}$ (mJ)	η (%)
1	0,710	0,018	0,161	0,529	14,950	7,909	0,671	10,918	2,338	77,18
2	0,696	0,016	0,160	0,525	15,010	7,880	0,672	11,194	2,642	74,89
3	0,721	0,020	0,168	0,552	15,060	8,313	0,667	11,252	2,272	78,54
4	0,711	0,021	0,170	0,561	15,080	8,460	0,662	11,401	2,279	78,78
5	0,712	0,020	0,164	0,541	15,010	8,120	0,706	11,626	2,800	74,36
6	0,728	0,021	0,171	0,562	15,070	8,469	0,653	11,275	2,153	79,73
7	0,682	0,021	0,156	0,513	14,980	7,685	0,742	11,175	2,748	73,66
8	0,717	0,020	0,169	0,555	14,910	8,275	0,655	11,137	2,207	78,94
9	0,694	0,021	0,159	0,525	14,960	7,854	0,672	11,034	2,508	75,80
10	0,686	0,019	0,161	0,530	14,960	7,929	0,664	11,146	2,553	75,64
\bar{x}	0,706	0,020	0,164	0,539	15,000	8,089	0,676	11,216	2,450	76,75

V následujícím grafu (Graf 4) je naznačen pro větší přehlednost i start měření, tedy čas, ve kterém byl sepnut spínač a platforma FRDM KL25Z byla zapojena do obvodu. Měření tedy nezačínalo na vyobrazených průbězích hned v čase 0. Toto je analogické pro všechny další grafy.

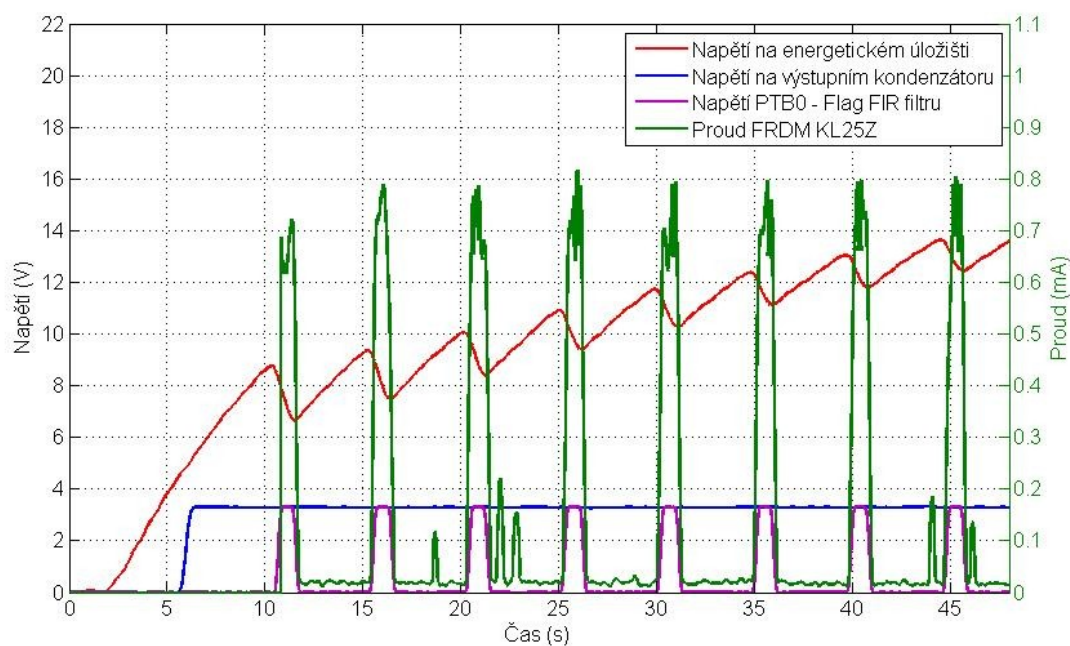


Graf 4 Příklad průběhů napětí a proudu pro výstupní napětí 3,3 V



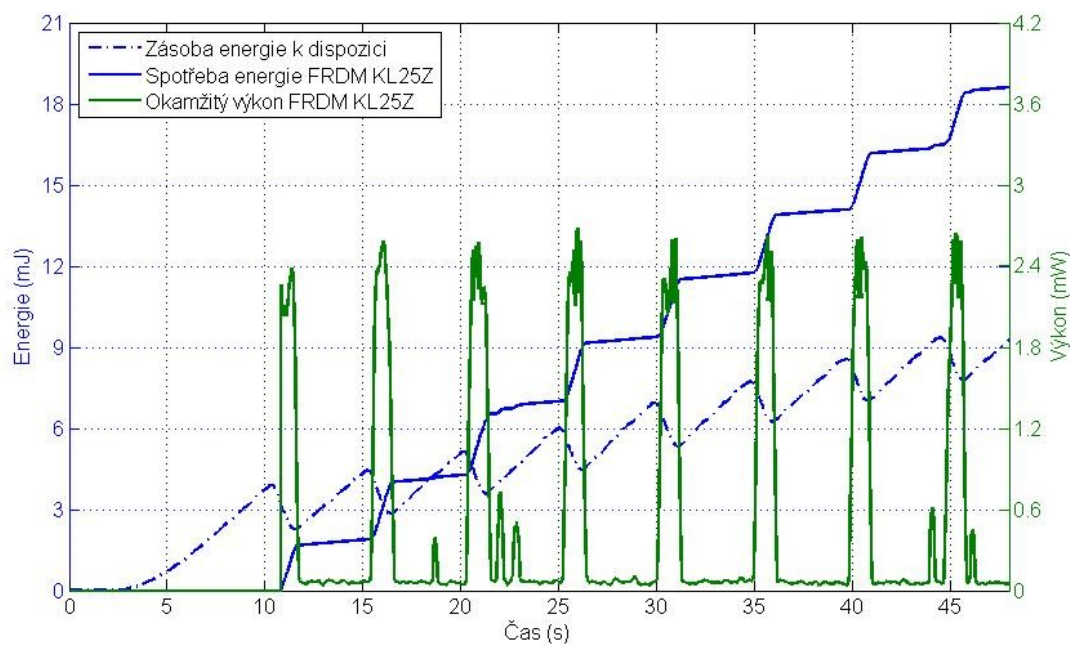
Graf 5 Příklad průběhů okamžitého výkonu a energie pro výstupní napětí 3,3 V

Kromě standardního procesu měření byl koncept otestován na to, zda dokáže při kontinuálním ohýbání piezoměniče (tzn. neodpojení zdroje kinetické energie) dodávat dostatek energie pro platformu aniž by se vyčerpala energie k dispozici. Energetické úložiště bylo nabito přibližně na 8 V a poté byl sepnut spínač pro připojení platformy FRDM KL25Z, přičemž zdroj kinetické energie pro piezoměnič zůstal zapnutý. Průběhy napětí a proudu tohoto testu jsou níže (Graf 6).



Graf 6 Příklad průběhů napětí a proudu pro výstupní napětí 3,3 V při kontinuálním dodávání kinetické energie piezoměniči

Jak lze vidět (Graf 7), koncept s neodpojeným zdrojem kinetické energie dokázal dodávat dostatečné množství energie pro kontinuální chod platformy.



Graf 7 Příklad průběhů okamžitého výkonu a energie pro výstupní napětí 3,3 V při kontinuálním dodávání kinetické energie piezoměniči

6.3.2 Výsledky při výstupním napětí harvesteru 1,8 V

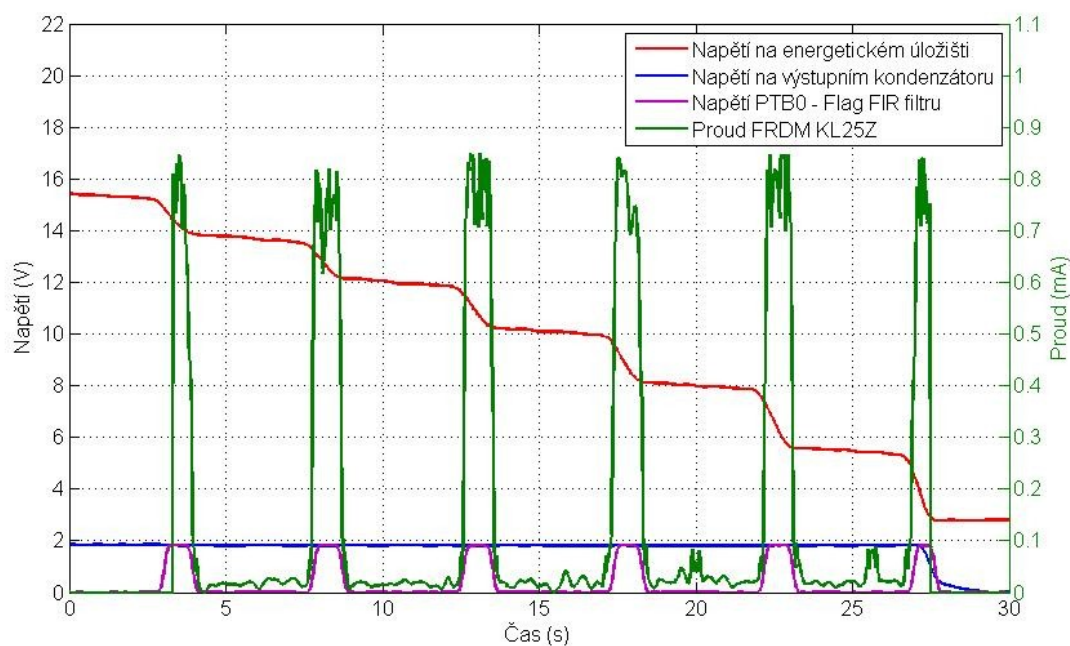
Tabulka 10 uvádí výsledky těchto měření. Změnou výstupního napětí harvesteru na 1,8 V se zásadně zvětšila střední hodnota doby chodu při stejné výchozí celkové dostupné energii přibližně 11,25 mJ na průměrných 24,28 sekund. Z grafu (Graf 8) vyplývá, že mikrokontrolér platformy FRDM KL25Z vykonal programový cyklus celý celkem pětkrát, přičemž šestý cyklus byl ukončen zhruba v polovině aktivního počítání FIR filtru. Oproti měření s výstupním napětím harvesteru 3,3 stoupla střední hodnota I_{RUN} a to na 0,764 mA, nicméně střední hodnota průměrného celkového proudu $I_{\text{PRŮM}}$ se zvětšila jen nepatrně v důsledku rozložení do delší doby chodu a nepatrnému snížení střední hodnoty I_{SLEEP} .

Střední hodnota průměrného výkonu oproti předešlému měření podle očekávání klesla, nicméně klesla i průměrná spotřebovaná energie platformy FRDM KL25Z, a to na 7,245 mJ (Graf 9). Na jednu stranu mikrokontrolér platformy vykonal o dva programové cykly více, než u předchozího měření, a to ještě navíc s menší celkovou spotřebovanou energií.

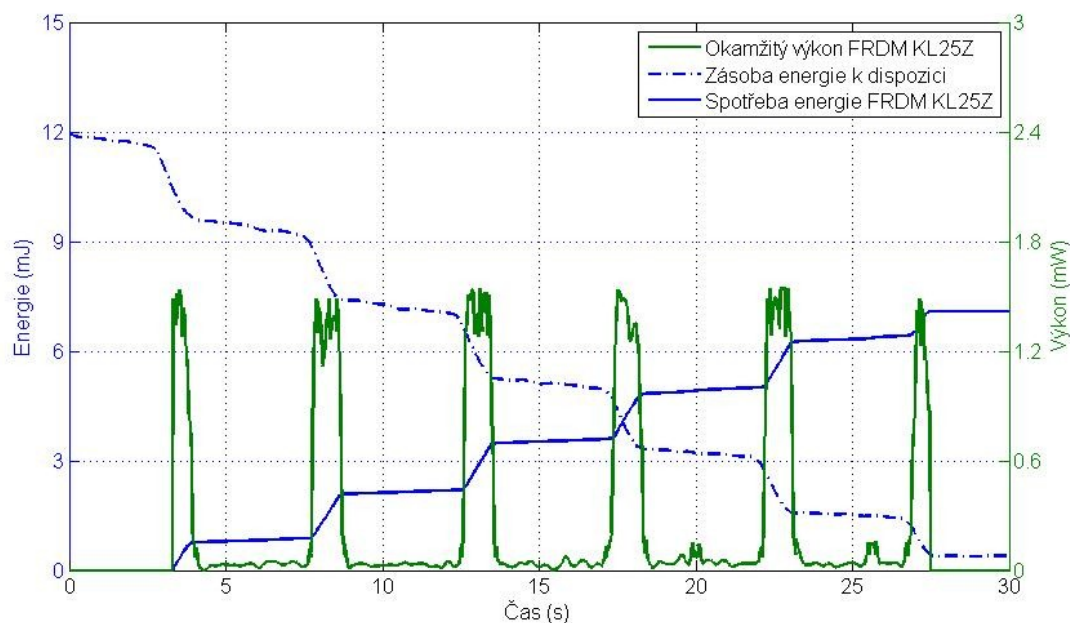
Na druhou stranu však také bylo ztraceno DC/DC měničem harvesteru více energie. Střední hodnota účinnosti harvesteru vyšla nižší a to konkrétně 67,16 %. Ztracené energie činností DC/DC měniče harvesteru totiž bylo při téměř totožných počátečních podmínkách měření (nabití energetického úložiště opět na 15 V, rozdíl je pouze v energii uložené na výstupním kondenzátoru) více než u předchozího měření.

Tabulka 10 Naměřené a vypočtené hodnoty pro měření při výstupním napětí harvesteru 1,8 V

č. měření	I_{RUN} (mA)	I_{SLEEP} (mA)	$I_{\text{PRŮM}}$ (mA)	$P_{\text{PRŮM}}$ (mW)	Doba chodu (s)	$E_{\text{SPOTŘEBOVANÁ}}$ (mJ)	$E_{\text{ZBYLÁ}}$ (mJ)	$E_{\text{CELKOVÁ}}$ (mJ)	$E_{\text{ZTRACENÁ}}$ (mJ)	η (%)
1	0,755	0,016	0,173	0,309	24,225	7,486	0,381	10,990	3,123	70,56
2	0,779	0,015	0,178	0,312	24,700	7,694	0,375	11,575	3,506	68,70
3	0,760	0,019	0,162	0,292	24,175	7,059	0,387	10,925	3,479	66,99
4	0,768	0,017	0,177	0,317	24,470	7,757	0,385	11,480	3,338	69,91
5	0,766	0,019	0,160	0,288	24,100	6,941	0,384	10,978	3,653	65,52
6	0,777	0,020	0,174	0,312	24,400	7,613	0,380	11,318	3,325	69,60
7	0,735	0,018	0,164	0,294	24,480	7,197	0,376	11,462	3,889	64,92
8	0,761	0,018	0,158	0,285	24,200	6,897	0,382	11,218	3,939	63,65
9	0,780	0,019	0,169	0,305	24,130	7,360	0,392	11,198	3,446	68,11
10	0,760	0,017	0,151	0,269	23,950	6,443	0,378	10,504	3,683	63,63
\bar{x}	0,764	0,018	0,167	0,298	24,283	7,245	0,382	11,165	3,538	67,16

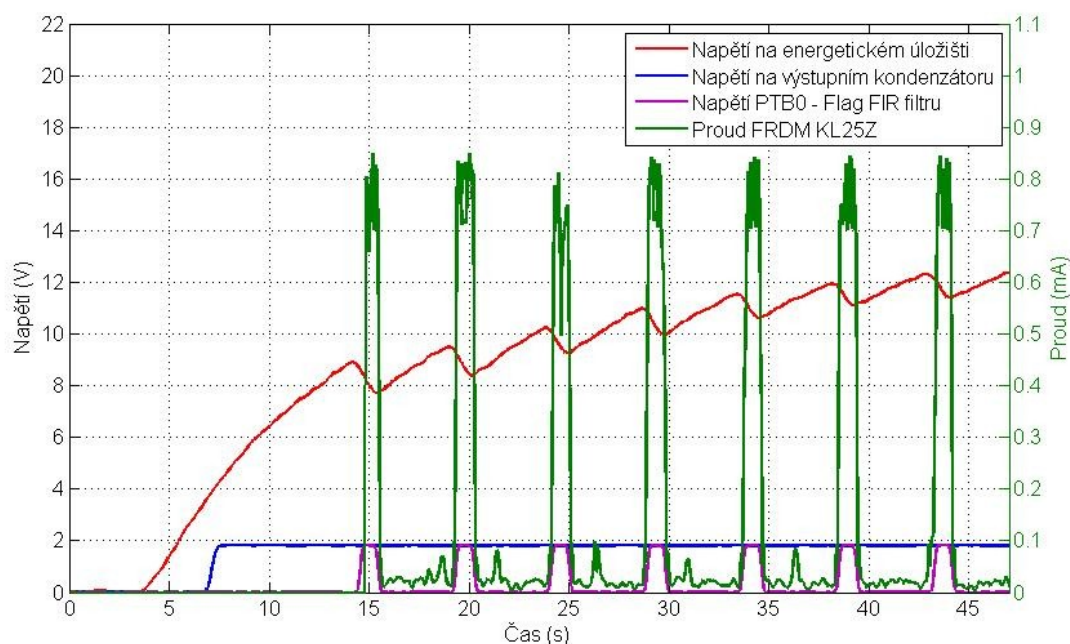


Graf 8 Příklad průběhů napětí a proudu pro výstupní napětí 1,8 V



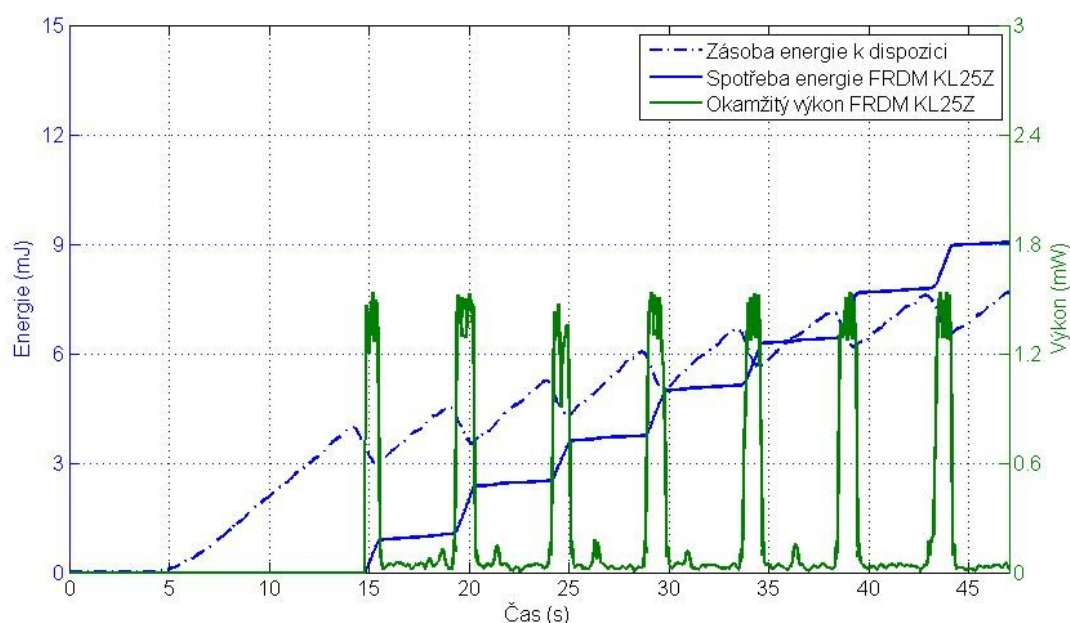
Graf 9 Příklad průběhů okamžitého výkonu a energie pro výstupní napětí 1,8 V

Opět bylo provedeno testování konceptu na to, zda dokáže při kontinuálním ohýbání piezoměniče (tzn. neodpojení zdroje kinetické energie) dodávat dostatek energie pro platformu aniž by se vyčerpala energie k dispozici. Postup tohoto měření byl stejný jako u výstupního napětí harvesteru 3,3 V, přičemž průběhy napětí a proudu tohoto testu popisuje následující graf (Graf 10).



Graf 10 Příklad průběhů napětí a proudu pro výstupní napětí 1,8 V při kontinuálním dodávání kinetické energie piezoměniči

Právě na grafu výše (Graf 10) lze spatřit důsledek zhoršené účinnosti DC/DC měniče harvesteru při vyšších napětích na energetickém úložišti a při nižším výstupním napětí harvesteru. Je tím totiž ovlivněna ona nelianerita – pomalejší dobíjení energetického úložiště. Napětí (a potažmo i energie) na začátku sedmého programového cyklu tohoto měření s výstupním napětím 1,8 V bylo navzdory menší spotřebované energii platformy nižší, než na začátku sedmého programového cyklu toho samého měření s výstupním napětím 3,3 V.



Graf 11 Příklad průběhů okamžitého výkonu a energie pro výstupní napětí 1,8 V při kontinuálním dodávání kinetické energie piezoměniči

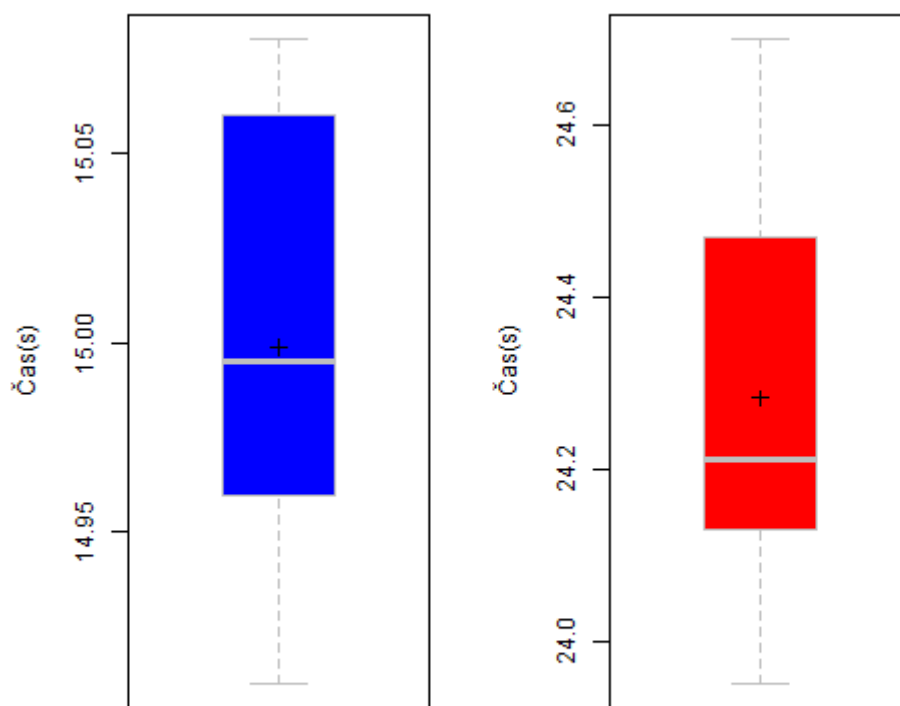
6.4 Statistická analýza výsledků

V rámci vyhodnocení výsledků byly mezi sebou porovnány datové celky obou měření – s výstupním napětím 1,8 V a 3,3 V. V kapitolách 6.3.1 a 6.3.2 v tabulkách byly uvedeny pouze bodové odhady středních hodnot naměřených proudů a vypočteného výkonu, účinnosti a energií. V této kapitole však proběhla detailní statistická analýza čtyř hlavních parametrů (veličin): doby chodu, spotřebovaná energie, ztracená energie a účinnosti. Pro každý parametr je nejprve nastíněn prvotní předpoklad vzájemných výsledků obou měření. Poté je pro každý parametr učen krabicový graf, bodový a 95% intervalový odhad rozdílu středních hodnot parametru a test statistické významnosti rozdílu středních hodnotu daného parametru.

6.4.1 Doba chodu

Doba chodu platformy FRDM KL25Z při výstupním napětí 1,8 V byla očekávána jako větší, než doba chodu při 3,3 V.

6.4.1.1 Vícenásobný krabicový graf



Doba chodu při výst. napětí harvestru 3,3 Doba chodu při výst. napětí harvestru 1,8

Graf 12 Vícenásobný krabicový graf analýzy doby chodu

6.4.1.2 Bodový a 95% intervalový odhad rozdílu středních hodnot doby chodu

Předpoklad: normalita

Exaktní ověření normality: H_0 : data pochází z normálního rozdělení
 $H_A: \neg H_0$

Tabulka 11 Shapiro – Wilkův test normality dat doby chodu

Výstupní napětí harvesteru (V)	p-hodnota
3,3	0,744
1,8	0,534

Nelze zamítnout nulovou hypotézu, se spolehlivostí 0,95 lze tvrdit, že data pochází z normálního rozdělení (Shapiro – Wilkův test, p hodnoty > 0,05).

Intervalový odhad rozdílu středních hodnot doby chodu:

$$P(9,12 < \mu_{1,8} - \mu_{3,3} < 9,44) = 0,950$$

Se spolehlivostí 0,95 lze při použití těchto dvou rozdílných výstupních napětí očekávat rozdíl středních hodnot doby chodu platformy v rozmezí 9,12 až 9,44 sekund. Bodový odhad rozdílu středních hodnot doby chodu je 9,28 sekund.

6.4.1.3 Test významnosti rozdílu středních hodnot dob chodu

Předpoklad: normalita, homoskedasticita (normalita ověřena u intervalového odhadu)

Exaktní ověření homoskedasticity: $H_0: \sigma_{1,8}^2 / \sigma_{3,3}^2 = 1.00$

$H_A: \sigma_{1,8}^2 / \sigma_{3,3}^2 \neq 1.00$

F-test, p-hodnota: $0,00037 < 0,05$

Nulová hypotéza se zamítá, se spolehlivostí 0,95 lze tvrdit, že data nemají shodné rozptyly (F-test, p hodnota < 0,05).

Aspinové -Welchův test: $H_0: \mu_{1,8} - \mu_{3,3} = 0$

$H_A: \mu_{1,8} > \mu_{3,3}$

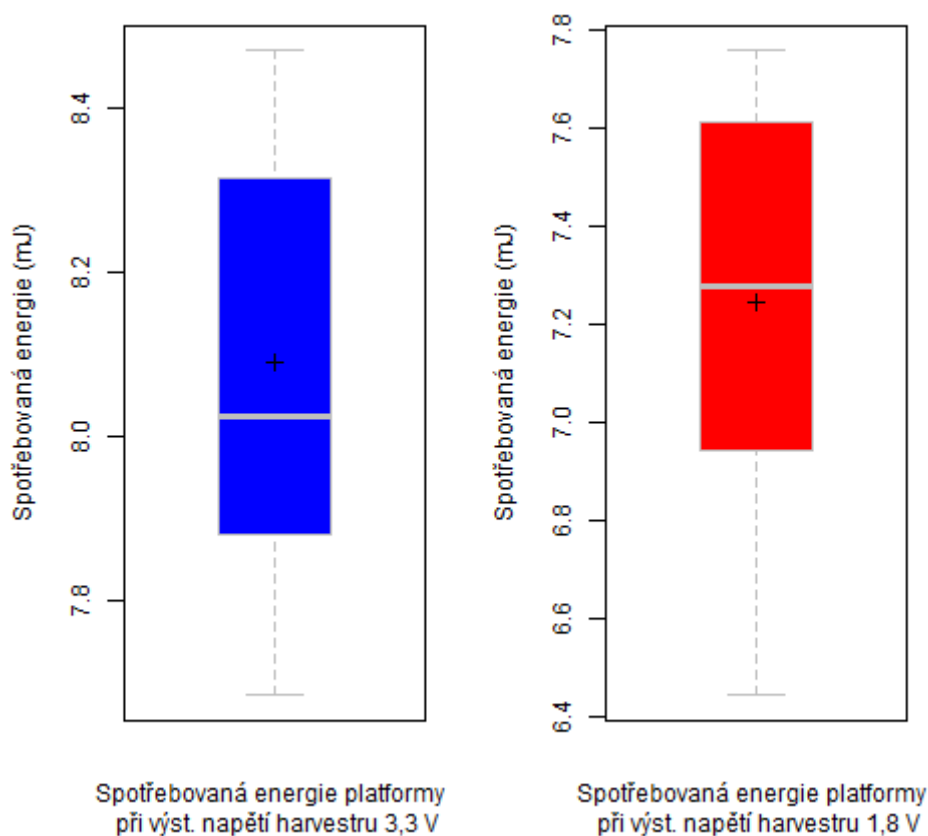
p-hodnota: $6,570268e-18 \ll 0,001$

Nulová hypotéza se zamítá, se spolehlivostí 0,95 lze tvrdit, že rozdíl středních hodnot doby chodu pro výstupní napětí harvesteru 3,3 V a 1,8 V je statisticky významný (Aspinové – Welchův test, p-hodnota << 0,001).

6.4.2 Spotřebovaná energie

Bylo předpokládáno, že pokud by byla účinnost DC/DC měniče harvesteru stejná v obou případech výstupního napětí harvesteru, tak spotřebovaná energie by byla stejná.

6.4.2.1 Vícenásobný krabicový graf



Graf 13 Vícenásobný krabicový graf analýzy spotřebované energie

6.4.2.2 Bodový a 95% intervalový odhad rozdílu středních hodnot spotřebované energie

Předpoklad: normalita

Exaktní ověření normality: H_0 : data pochází z normálního rozdělení
 H_A : $\neg H_0$

Tabulka 12 Shapiro – Wilkův test normality dat spotřebované energie

Výstupní napětí harvesteru (V)	p-hodnota
3,3	0,338
1,8	0,670

Nelze zamítnout nulovou hypotézu, se spolehlivostí 0,95 lze tvrdit, že data pochází z normálního rozdělení (Shapiro – Wilkův test, p hodnoty > 0,05).

Intervalový odhad rozdílu středních hodnot spotřebované energie:

$$P(0,51 < \mu_{3,3} - \mu_{1,8} < 1,18) = 0,950$$

Se spolehlivostí 0,95 lze při použití těchto dvou rozdílných výstupních napětí očekávat rozdíl středních hodnot spotřebované energie platformy v rozmezí 0,51 až 1,18 mJ. Bodový odhad rozdílu středních hodnot spotřebované energie je 0,85 mJ.

6.4.2.3 Test významnosti rozdílu středních hodnot spotřebované energie

Předpoklad: normalita, homoskedasticita (normalita ověřena u intervalového odhadu)

Exaktní ověření homoskedasticity:

$$H_0: \sigma_{1,8}^2 / \sigma_{3,3}^2 = 1.00$$
$$H_A: \sigma_{1,8}^2 / \sigma_{3,3}^2 \neq 1.00$$

F-test, p-hodnota: $0,239 > 0,05$

Nelze zamítnout nulovou hypotézu, se spolehlivostí 0,95 lze tvrdit, že data mají shodné rozptyly (F-test, p hodnota $> 0,05$).

Studentův t-test:

$$H_0: \mu_{1,8} - \mu_{3,3} = 0$$
$$H_A: \mu_{1,8} - \mu_{3,3} \neq 0$$

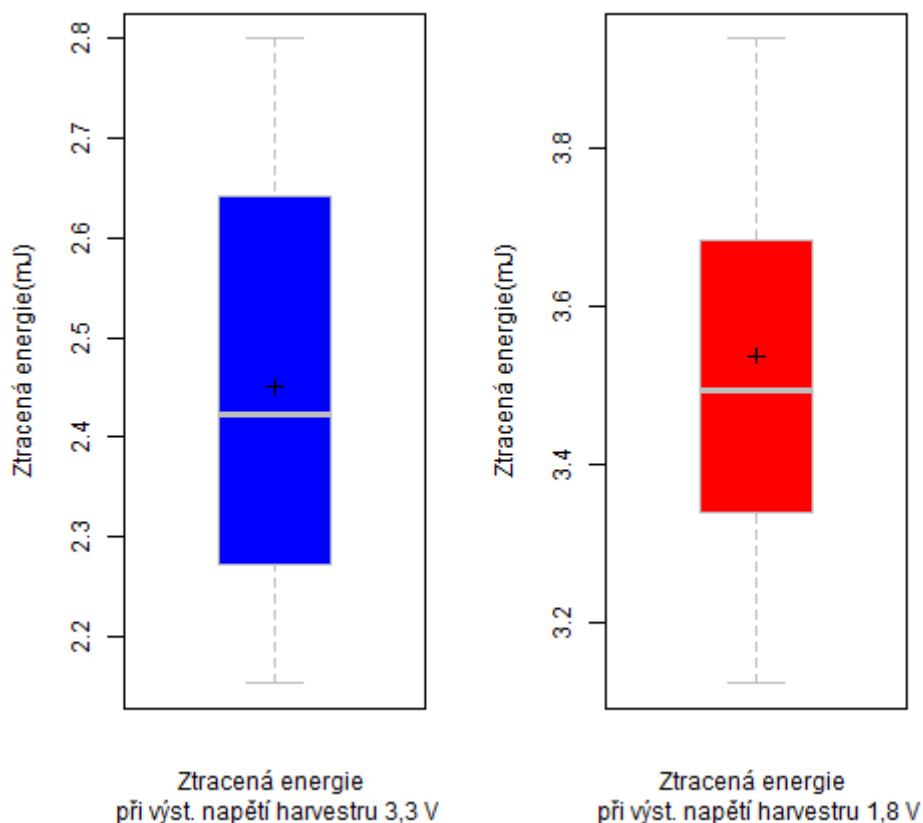
p-hodnota: $4,474665e-05 \ll 0,001$

Nulová hypotéza se zamítá, se spolehlivostí 0,95 lze tvrdit, že rozdíl středních hodnot spotřebované energie platformy pro výstupní napětí harvesteru 3,3 V a 1,8 V je statisticky významný (Studentův t-test, p-hodnota $\ll 0,001$).

6.4.3 Ztracená energie

Pokud by byla účinnost DC/DC měniče harvesteru stejná v obou případech výstupního napětí harvesteru, tak i celková ztracená energie tímto měničem harvesteru by byla přibližně stejná.

6.4.3.1 Vícenásobný krabicový graf



Graf 14 Vícenásobný krabicový graf analýzy ztracené energie

6.4.3.2 Bodový a 95% intervalový odhad rozdílu středních hodnot ztracené energie

Předpoklad: normalita

Exaktní ověření normality: H_0 : data pochází z normálního rozdělení
 H_A : $\neg H_0$

Tabulka 13 Shapiro – Wilkův test normality dat ztracené energie

Výstupní napětí harvesteru (V)	p-hodnota
3,3	0,416
1,8	0,850

Nelze zamítnout nulovou hypotézu, se spolehlivostí 0,95 lze tvrdit, že data pochází z normálního rozdělení (Shapiro – Wilkův test, p hodnoty $> 0,05$).

Intervalový odhad rozdílu středních hodnot ztracené energie:

$$P(0,86 < \mu_{1,8} - \mu_{3,3} < 1,31) = 0,950$$

Se spolehlivostí 0,95 lze při použití těchto dvou rozdílných výstupních napětí očekávat rozdíl středních hodnot ztracené energie DC/DC měničem v rozmezí 0,86 až 1,31 mJ. Bodový odhad rozdílu středních hodnot ztracené energie je 1,09 mJ.

6.4.3.3 Test významnosti rozdílu středních hodnot ztracené energie

Předpoklad: normalita, homoskedasticita (normalita ověřena u intervalového odhadu)

Exaktní ověření homoskedasticity: $H_0: \sigma_{1,8}^2 / \sigma_{3,3}^2 = 1.00$

$$H_A: \sigma_{1,8}^2 / \sigma_{3,3}^2 \neq 1.00$$

F-test, p-hodnota: $0,772 > 0,05$

Nelze zamítnout nulovou hypotézu, se spolehlivostí 0,95 lze tvrdit, že data mají shodné rozptyly (F-test, p hodnota $> 0,05$).

Studentův t-test:

$$H_0: \mu_{1,8} - \mu_{3,3} = 0$$

$$H_A: \mu_{1,8} - \mu_{3,3} \neq 0$$

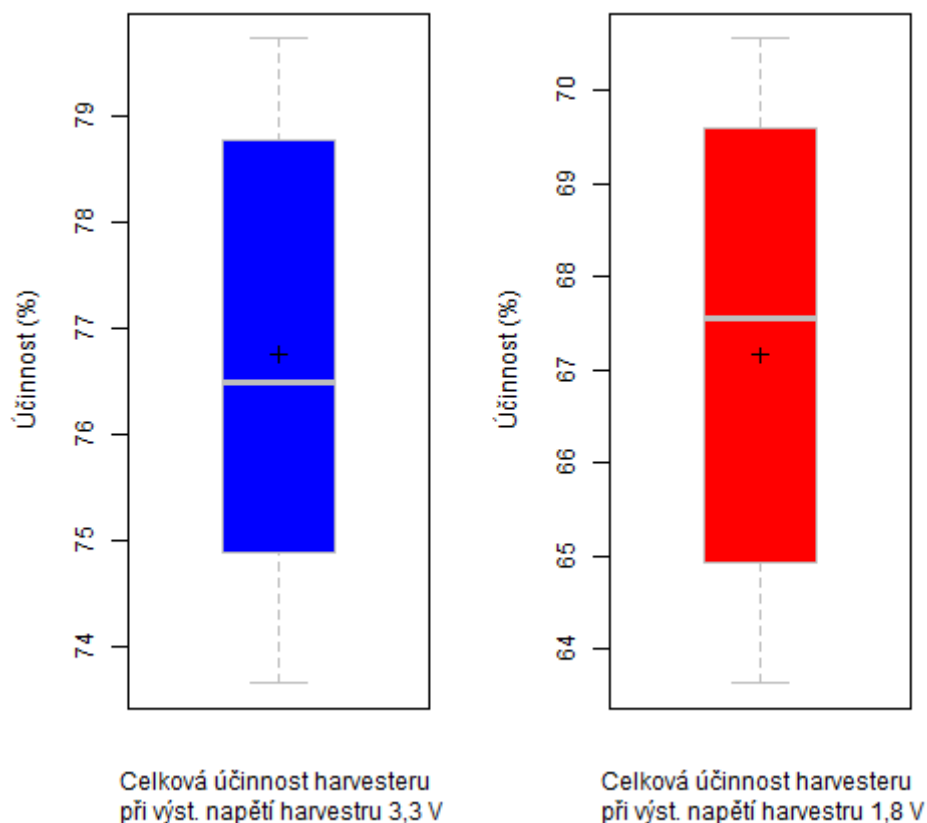
p-hodnota: $9,332974\text{e-}09 \ll 0,001$

Nulová hypotéza se zamítá, se spolehlivostí 0,95 lze tvrdit, že rozdíl středních hodnot ztracené energie DC/DC měničem pro výstupní napětí harvesteru 3,3 V a 1,8 V je statisticky významný (Studentův t-test, p-hodnota $\ll 0,001$).

6.4.4 Účinnost

Podle technické dokumentace harvesteru energie byla očekávána nižší účinnost při výstupním napětí harvesteru 1,8 V, než u 3,3 V.

6.4.4.1 Vícenásobný krabicový graf



Graf 15 Vícenásobný krabicový graf analýzy účinnosti

6.4.4.2 Bodový a 95% intervalový odhad rozdílu středních hodnot účinnosti

Předpoklad: normalita

Exaktní ověření normality: H_0 : data pochází z normálního rozdělení
 H_A : $\neg H_0$

Tabulka 14 Shapiro – Wilkův test normality dat účinnosti

Výstupní napětí harvesteru (V)	p-hodnota
3,3	0,396
1,8	0,337

Nelze zamítnout nulovou hypotézu, se spolehlivostí 0,95 lze tvrdit, že data pochází z normálního rozdělení (Shapiro – Wilkův test, p hodnoty $> 0,05$).

Intervalový odhad rozdílu středních hodnot účinnosti:

$$P(7,35 < \mu_{3,3} - \mu_{1,8} < 11,84) = 0,950$$

Se spolehlivostí 0,95 lze při použití těchto dvou rozdílných výstupních napětí očekávat rozdíl středních hodnot účinnosti konceptu v rozmezí 7,35 až 11,48 %. Bodový odhad rozdílu středních hodnot účinnosti je 9,59 %.

6.4.4.3 Test významnosti rozdílu středních hodnot účinnosti

Předpoklad: normalita, homoskedasticita (normalita ověřena u intervalového odhadu)

Exaktní ověření homoskedasticity: $H_0: \sigma_{1,8}^2 / \sigma_{3,3}^2 = 1.00$

$$H_A: \sigma_{1,8}^2 / \sigma_{3,3}^2 \neq 1.00$$

F-test, p-hodnota: $0,590 > 0,05$

Nelze zamítnout nulovou hypotézu, se spolehlivostí 0,95 lze tvrdit, že data mají shodné rozptyly (F-test, p hodnota $> 0,05$).

Studentův t-test: $H_0: \mu_{3,3} - \mu_{1,8} = 0$

$$H_A: \mu_{3,3} > \mu_{1,8}$$

p-hodnota: $2,309669\text{e-}08 \ll 0,001$

Nulová hypotéza se zamítá, se spolehlivostí 0,95 lze tvrdit, že rozdíl středních hodnot ztracené energie DC/DC měničem pro výstupní napětí harvesteru 3,3 V a 1,8 V je statisticky významný (Studentův t-test, p-hodnota $\ll 0,001$).

6.5 Shrnutí a zhodnocení naměřených výsledků

Proces měření byl rozdělen na dvě části a to podle zvoleného výstupního napětí harvesteru (1,8 V a 3,3 V), tedy napájecího napětí platformy. Obě tyto napájecí napětí měly dle technické dokumentace zajistit plnohodnotný chod mikrokontroléru KL25. Ve výsledku byl v práci zkoumán vliv dvou očekávaných protichůdných jevů na celkové energetické vlastnosti konceptu – snížení energetické spotřeby v důsledku snížení výstupního napětí harvesteru versus zhoršená účinnost DC/DC měniče při nižším výstupním napětí harvesteru.

V první fázi každého měření koncept energii získával a energetické úložiště se nabílo na 15 V, což odpovídalo výchozí energii přibližně 11,25 mJ. Od této výchozí energie se odvíjely veškeré výpočty a kvalitativní úvahy v práci. Zjednodušeně lze říci, že bylo analyzováno, jak je harvester energie schopen naložit s touto výchozí energií (s jakou účinností) při jeho různých výstupních napětích. Křivka nabíjení energetického úložiště (zvyšování napětí na něm) nebyla lineární, a čas nabíjení při různých výstupních napětí harvesteru se podstatně lišil. Energií přibližně 11,25 mJ při výstupním napětí harvesteru 3,3 V se podařilo získat za 25 vteřin, kdežto u 1,8 V to bylo za 39 vteřin. Toto bylo přisuzováno deklarované nižší účinnosti harvesteru při vyšších napětích na energetickém úložišti. Ve fázi, kdy byla křivka nabíjení přibližně lineární, se za jeden ohyb (tedy 0,75 s) podařilo zvětšit napětí na energetickém úložišti o přibližně 0,625 V. V druhé fázi byl sepnut spínač a probíhalo samotné měření proudu a napětí až do vyčerpání použitelné energie na úložišti.

Tabulka 15 Porovnání bodových odhadů středních hodnot zpracovaných parametrů pro obě výstupní napětí harvesteru

	Napětí 3,3 V	Napětí 1,8 V
I_{RUN} (mA)	0,706	0,764
I_{SLEEP} (mA)	0,020	0,018
$I_{\text{PRŮM}}$ (mA)	0,164	0,167
$P_{\text{PRŮM}}$ (mW)	0,539	0,298
Doba chodu (s)	15,000	24,283
$E_{\text{SPOTŘEBOVANÁ}}$ (mJ)	8,089	7,245
$E_{\text{ZBYLÁ}}$ (mJ)	0,676	0,382
$E_{\text{CELKOVÁ}}$ (mJ)	11,216	11,165
$E_{\text{ZTRACENÁ}}$ (mJ)	2,450	3,538
η (%)	76,75	67,16

Výsledky měření odpovídaly předpokladům a porovnání je ještě pro přehlednost uvedeno v tabulce výše (Tabulka 15). Při výstupním napětí harvesteru 1,8 V byla doba chodu platformy výrazně delší, a to v průměru o 9,28 sekund. Platforma tak byla schopna vykonat téměř o dva programové cykly více, než při výstupním napětí harvesteru 3,3 V. Z výsledných grafů (Graf 5 vs Graf 7) vyplývá, že za stejnou dobu chodu (15 sekund) spotřebovala platforma při výstupním napětí harvesteru 1,8 V přibližně o polovinu méně energie, než při 3,3 V. Z tohoto pohledu se jeví výstupní napětí harvesteru 1,8 V jako mnohem lepší volba, zvláště pokud je brán v potaz fakt, že celková spotřebovaná energie při tomto výstupním napětí za celou dobu chodu byla stále o průměrných 0,85 mJ nižší. Pokud by však účinnost konceptu byla stejná při obou výstupních napětích, očekával bych, že

na konci doby chodu bude spotřebovaná energie zhruba totožná pro oba případy výstupních napětí. Jenže účinnost konceptu při výstupním napětí 1,8 V byla o 9,59 % nižší než u 3,3 V, což se odráželo i ve ztracené energii prací DC/DC měniče harvesteru. Při výstupním napětí 1,8 V bylo z původní dostupné energie prací DC/DC měniče ztraceno průměrně o 1,09 mJ více, než při 3,3 V, nicméně za delší dobu chodu. Porovnání ztracené energie však může být dosti zavádějící, kvůli rozdílným dobám chodu platformy při rozdílném výstupním napětí. Pouhým vztažením ztracené energie k výchozí energii byl tedy pojem ztracené energie značně zjednodušen.

Statistická analýza potvrdila důležité ověření předpokládaných vlastností konceptu. Veškerá použitá data pocházela z normálního rozdělení, v měřeních se tedy nevyskytovaly odlehlé hodnoty, které by hrubě narušovaly strukturu dat. Testy významnosti potvrdily, že rozdíly středních hodnot testovaných parametrů byly statisticky významné a tudíž je lze brát vážně.

7 Závěr

Navrhnutý a realizovaný hybridní koncept bez-bateriového napájení zařízení pomocí kinetického měniče byl schopen spolehlivě dodávat energii vývojové platformě FRDM KL25Z. Tento koncept, navrhnutý pomocí vývojových kitů, dokázal získat, zpracovat, uložit a dodávat dostatek energie buď pro dočasný nebo kontinuální provoz platformy FRDM KL25Z. Koncept byl při zisku energie značně limitován velikostí a pravidelností dodávky kinetické energie, která působila na kinetický měnič. Spotřeba energie platformy byla snížena hardwarovými úpravami a softwarovým nastavením mikrokontroléru KL25 na minimum, čímž simulovala jakékoliv jiné reálné low-power zařízení. Mikrokontrolér KL25 na vývojové platformě FRDM KL25Z cyklicky vykonával sadu užitečných programových instrukcí, konkrétně získání dat z kapacitního snímače a následné filtrování těchto dat FIR filtrem 7 řádu.

Jako kinetický měnič byl z dostupných druhů vybrán piezoelektrický měnič, a to z důvodu jeho velké výkonové hustoty, jednoduché aplikace a ověřené kompatibility s harvesterem energie LTC3588. Zvolený piezoměnič PPA-1011 v podobě vetknutého nosníku byl na hrotu s frekvencí 1,33 Hz ohýbán plastovým ramenem umístěným na hřideli elektromotoru. Tím bylo zajištěno pravidelné, standardizované a popsitelné dodání kinetické energie, jež deformovala piezomateriál pevně ukotveného měniče PPA-1011, čímž bylo získáváno střídavé elektrické napětí.

Blok, jenž se staral o usměrnění získaného střídavého napětí, uložení energie, regulaci a dodávání konstantního stejnosměrného napájecího napětí pro platformu FRDM KL25Z, byla deska Energy Harvester Breakout - LTC3588. Hlavní komponentu této desky představoval právě harvester energie LTC3588. V tomto bloku proběhlo nejprve usměrnění získaného střídavého napětí, a poté uložení energie na energetické úložiště, jež představoval elektrolytický kondenzátor o kapacitě 100 μF . Kapacita úložiště byla záměrně zvolena nižší, než je v podobných aplikacích běžné (obvykle se používají superkapacity o kapacitě minimálně 1mF), a to z důvodu většího počtu prováděných měření a pomalé doby nabíjení větších kondenzátorů. Účelem práce totiž nebylo pouze navrhnout koncept s co největším energetickým úložištěm, které by bylo nabíjeno po dobu hodin či dnů, ale reálně demonstrovat celý proces od zisku energie, přes její uložení až po použití této energie a vybití energetického úložiště. Z opakovaných, statisticky zpracovaných měření tohoto procesu pak byla vyhodnocena doba chodu platformy, spotřebovaná energie, ztracená energie a účinnost konceptu.

I po shrnutí a statistickém vypracování výsledků (v kapitolách 6.5 a 6.4) je rozhodnutí vhodnějšího výstupního napětí harvesteru složité, použití nižšího výstupního napětí harvesteru 1,8 V se ale jeví jako lepší volba. Mikrokontrolér platformy byl při tomto nižším napětí schopen vykonat více programových cyklů s výrazně menší spotřebou energie. Při tomto napětí je však doba nabíjení úložiště výrazně delší – trvalo to 39 sekund (oproti 25 sekundám při napětí 3,3 V). V realitě by tak velmi záleželo na době, po kterou na piezoměnič působí kinetická energie, jelikož samotné získávání a ukládání energie harvesterem a účinnost konceptu je lepší při výstupním napětí 3,3 V. Zlepšením efektivity práce harvesteru při nastaveném výstupním napětí 1,8 V by byla volba tohoto výstupního napětí 1,8 V naprosto jasná.

Pro další vývoj konceptu by byla vhodná implementace softwarového kontroléru, který by monitoroval úroveň dostupné energie na energetickém úložišti. Mikrokontrolér by se tak neprobouzel z úsporného režimu periodicky vnitřním přerušením z časovače, ale právě v závislosti na dostupné energii.

V práci byl zanedbán vliv samovolného vybíjení energetického úložiště, protože prakticky okamžitě po jeho nabití (zisku energie) byla do obvodu zapojena zátěž (platforma FRDM KL25Z). Uplatnění by navrhnutý koncept mohl najít v mnoha reálných aplikacích, kde se nachází zdroj pravidelné kinetické energie nebo vibrací např. letecké motory, střechy vlaků atd. Pokud by byl koncept umístěn do prostředí, kde by získával energii v řádu hodin či dnů, energetické úložiště by mohlo mít kapacitu až desítky F. Ohyb konce piezoměniče by tudíž nemusel být tak velký jako v této práci, jelikož velké množství energie by bylo v tak dlouhém čase a s tak velkou kapacitou získáno i s menší amplitudou napětí z piezoměniče. Pro naprostou spolehlivost by však musel být koncept doplněn o záložní zdroj energie v případě dlouhodobé absence kinetické energie z prostředí.

Literatura

- [1] ROMERO, Edwar. *Powering biomedical devices*. ISBN 01-240-7783-8.
- [2] HANNAN, Mahammad A., et al. Energy harvesting for the implantable biomedical devices: issues and challenges. *Biomedical engineering online*, 2014, 13.1: 79.
- [3] ERTURK, Alper a D. J. INMAN. *Piezoelectric energy harvesting*. Chichester: Wiley, 2011.
- [4] ROMERO, E, R O WARRINGTON a M R NEUMAN. Energy scavenging sources for biomedical sensors. *Physiological Measurement* [online]. 2009, **30**(9), R35-R62 [cit. 2017-01-18]. DOI: 10.1088/0967-3334/30/9/R01. ISSN 0967-3334. Dostupné z: <http://stacks.iop.org/0967-3334/30/i=9/a=R01?key=crossref.966afa3bc6e4fa2784fbcc11d1ee49ba>
- [5] HAVINGA, Paul JM; SMIT, Gerard JM. Design techniques for low-power systems. *Journal of Systems Architecture*, 2000, 46.1: 1-21.
- [6] MATEU, Loreto, Francesc MOLL, Jose F. LOPEZ, Francisco V. FERNANDEZ, Jose Maria LOPEZ-VILLEGAS a Jose M. DE LA ROSA. Review of energy harvesting techniques and applications for microelectronics (Keynote Address), 359-373. DOI: 10.1117/12.613046. Dostupné také z: <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?articleid=865764>
- [7] PRAUZEK, Michal. *Metody řízení pro energeticky nezávislé a vestavěné měřicí systémy*. Ostrava, 2017. Habilitační práce. VŠB - TUO.
- [8] *Ekologické bydlení* [online]. 2017 [cit. 2017-06-14]. Dostupné z: <http://www.ekobydleni.eu/solarni-elektrarny/kolik-elektriny-vyrobi-solarni-panel-vyplati-se>
- [9] *Indiamart: RFID Card 125KHz* [online]. 2017 [cit. 2017-06-14]. Dostupné z: <https://www.indiamart.com/proddetail/rfid-card-125khz-7223517330.html>
- [10] HEHN, Throsten a Yiannos MANOLI. *CMOS circuits for Piezoelectric energy harvesters*. 2015. ISBN 978-940-1792-875.
- [11] CHING, Neil NH, et al. PCB integrated micro-generator for wireless systems. In: *Intl. Symp. on Smart Structures and Microsystems*. 2000. p. 19-21.
- [12] *Instrukční a studijní materiály: NÁVRH A SIMULACE MIKROSTRUKTUR* [online]. VUT Brno, 2011 [cit. 2017-06-15]. Dostupné z: <http://www.umel.feec.vutbr.cz/nanoteam/data/soubory/Kurz%20Coventor.doc>
- [13] MENINGER, S., J.O. MUR-MIRANDA, R. AMIRTHARAJAH, A. CHANDRAKASAN a J.H. LANG. Vibration-to-electric energy conversion. *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems* [online]. 2001, 9(1), 64-76 [cit. 2017-06-15]. DOI: 10.1109/92.920820. ISSN 1063-8210. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/920820/>
- [14] WALDROP, M. Mitchell. The chips are down for Moore's law. *Nature* [online]. 2016-2-9, 530(7589), 144-147 [cit. 2017-06-16]. DOI: 10.1038/530144a. ISSN 0028-0836. Dostupné z: <http://www.nature.com/doifinder/10.1038/530144a>
- [15] PIGUET, Christian. *Low-power CMOS circuits: technology, logic design and CAD tools*. Boca Raton, FL: CRC/Taylor, 2006. ISBN 978-084-9395-376.
- [16] Musilek, P.; Prauzek, M.; Krömer, P.; Rodway, J.; Bartoň, T. Intelligent Energy Management for Environmental Monitoring Systems. In *Smart Sensors Networks: Communication Technologies and Intelligent Applications*; Xhafa, F., Leu, F.Y., Hung, L.L., Eds.; Intelligent Data Centric Systems; Elsevier: San Diego, CA, USA, 2017; pp. 67–94

- [17] *KL25 Sub-Family Reference Manual: KL25P80M48SF0RM*. Rev. 3. Freescale Semiconductor, 2012. Dostupné také z: http://cache.freescale.com/files/32bit/doc/ref_manual/KL25P80M48SF0RM.pdf
- [18] KOMPIS, Costis; SUREKA, Prateek. Power management technologies to enable remote and wireless sensing. *ESP KTN, Teddington, UK, Tech. Rep*, 2010
- [19] KOMPIS, Costis; ALIWELL, Simon. Energy harvesting technologies to enable remote and wireless sensing. *Sensors and Instrumentation-Knowledge Transfer Network*, 2008.
- [20] *Midé PPA PRODUCTS: Datasheet & User Manual*. No. 002. 2016. Dostupné také z: <https://info.mide.com/hubfs/ppa-piezo-product-datasheet.pdf?hsCtaTracking=b40269b7-eb42-4234-a7ae-d6b9bfa6f122%7C8b655dfb-a489-4b33-9a15-e1c5c381bb78>
- [21] KIM, Dong-Gun, So-Nam YUN, Young-Bog HAM a Jung-Ho PARK. Energy Harvesting Strategy Using Piezoelectric Element Driven by Vibration Method. *Wireless Sensor Network* [online]. 2010, 02(02), 100-107 [cit. 2017-06-17]. DOI: 10.4236/wsn.2010.22014. ISSN 1945-3078. Dostupné z: <http://www.scirp.org/journal/PaperDownload.aspx?DOI=10.4236/wsn.2010.22014>
- [22] *GM electronic: Elektrický motor s převodovkou GM20-180SHV-62.5-R* [online]. 2017 [cit. 2017-06-17]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/elektricky-motor-s-prevodovkou-gm20-180shv-62-5-r>
- [23] *LTC3588-1 - Nanopower Energy Harvesting Power Supply: Datasheet*. 2010. Dostupné také z: <http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/35881fc.pdf>
- [24] SparkFun Energy Harvester Breakout - LTC3588. *Sparkfun* [online]. 2016 [cit. 2017-06-17]. Dostupné z: <https://www.sparkfun.com/products/9946>
- [25] *Kinetis KL25 Sub-Family: Data Sheet: Technical Data*. Rev 5. 2014. Dostupné také z: <http://www.nxp.com/assets/documents/data/en/data-sheets/KL25P80M48SF0.pdf>
- [26] *FRDM-KL25Z: Freedom Development Platform for Kinetis® KL14, KL15, KL24, KL25 MCUs* [online]. 2017 [cit. 2017-06-17]. Dostupné z: <http://www.nxp.com/products/software-and-tools/hardware-development-tools/freedom-development-boards/freedom-development-platform-for-kinetis-kl14-kl15-kl24-kl25-mcus:FRDM-KL25Z>
- [27] *FRDM-KL25Z Schematics*. 2013. Dostupné také z: http://www.nxp.com/assets/downloads/data/en/schematics/FRDM-KL25Z_SCH_REV_E.pdf

Seznam příloh

Příloha I Rešeršní práce použití kinetických měničů a jejich porovnání (26 stran).....	79
Příloha II Schéma implementovaného programového cyklu mikrokontroléru KL25.....	105
Příloha III Blokové schéma postupu měření	106
Příloha IV CD.....	107

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství

Rešeršní práce

Použití technologií energetických měničů
pracujících na základě přeměny kinetické energie

Počet stran: 26

2017

Václav Bajgar

A. Úvod rešerše

Získávání energie z prostředí (energy harvesting) se ukázalo být zajímavou alternativou pro napájení elektronických zařízení a systémů, a to díky skoro nekonečné životnosti a nezávislosti na jakýchkoli palivech pro samotné získávání energie. Dalším faktorem je nárůst popularity bezdrátových technologií, který slibuje nové možnosti aplikací nejen v medicínských monitorovacích systémech, avšak pro ty zde pořád existují limity kvůli omezené životnosti baterií a velikosti zařízení. Zde se právě otevírají dveře pro technologie získávající energii z prostředí. Kompromis mezi životností baterie a velikostí zařízení je důležitým faktorem, který omezuje celkovou životnost, rozměry a funkčnost autonomních elektronických zařízení. Získávání energie ze zdrojů jakým jsou např. pohyb, světlo, či teplotní změny bylo zpřístupněno pro alternativní napájení běžných zařízení z každodenního života: svítidly, kalkulačky se solárními panely, rádiové přijímače, kineticky a termálně napájené hodinky atp.[1]

Zdrojem energie pro technologie získávající energii z prostředí může být člověk sám nebo životní prostředí. Tato rešerše se tedy zaměřuje na kinetické měniče. Jsou zde popsány různé použití tří hlavních druhů těchto měničů podle typu energie z prostředí, jimiž jsou elektromagnetické, piezoelektrické a elektrostatické měniče. Rešerše je zaměřena primárně na technologie měničů, jejichž zdrojem energie je člověk, vzhledem ke studovanému oboru studenta, jsou však uvedeny i příklady technologií měničů získávající energii z životního prostředí. Ve výsledku ale typ prostředí nemá vliv na fundamentální základ přeměny energie pro každý typ kinetického měniče, pouze ovlivňuje dostupné nebo získané množství energie. Pro každý jednotlivý článek jsou popsány principy mechanismu získávání energie z prostředí a energetické limity (získaná energie) tohoto použití.

Na konci je uvedeno srovnání těchto technologií měničů z hlediska výhod a nevýhod a stručný závěr.

B. Klíčová Slova

Získávání energie, získávání energie z pohybu, harvester, piezoelektrický měnič, elektromagnetický měnič, elektrostatický měnič, generátor energie

C. Key words

Energy harvesting, kinetic energy harvesting, energy harvester, piezoelectric energy transducer, electromagnetic energy transducer, electrostatic energy transducer, power generator,

D. Zdroje

IEEE, Pubmed, Google Patenty, Science, Springer (link), Scientific research

E. Patent: PIEZOELECTRIC ENERGY CONVERTER FOR ELECTRONIC IMPLANTS

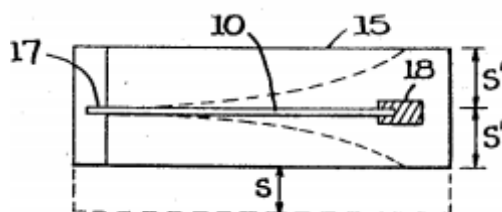
Český název: Piezoelektrický měnič pro elektronické implantabilní zařízení

Zdrojová databáze: Google patenty

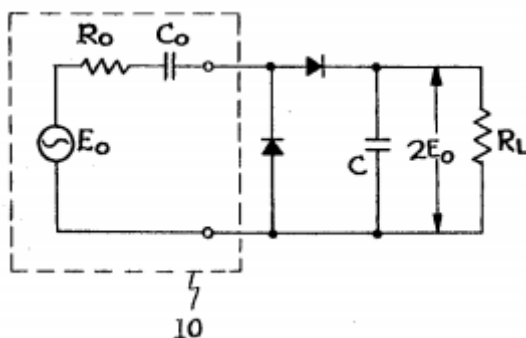
Bibliografický záznam: KO, Wen.H. *PIEZOELECTRIC ENERGY CONVERTER FOR ELECTRONIC IMPLANTS*. US. 3456134. Uděleno 15.7 1969.

Stručné shrnutí článku:

Vědec Ko byl jeden z prvních, kdo se piezoelektrickými měniči, které využívají lidské pohyby k vytvoření elektrické energie, zabýval, což je dokázáno i v patentu US 3456134. Proffesor Ko vymyslel uzavřený piezoelektrický krystal ve tvaru vetknutého nosníku, který byl zatížen na svém volném konci. Zařízení bylo navrženo tak, aby rezonovalo na vhodné frekvenci, čímž generovalo signál, který byl zesílen napěťovým násobičem (zdvojnásoboval napětí). Získaná energie by pak sloužila k napájení implantabilních zařízení, jako jsou třeba kardiostimulátory či bezdrátový telemetrický systém. V té době totiž šlo o nový mód operace, kdy piezoelektrický měnič energie konvertoval pohyby těla při nulovém kontaktu piezoelektrického krystalu se zdrojem vibrací a pohybu. Měnič byl tedy umístěn v ochranném obalu (kontejneru). Mechanický pohyb byl přenášen na krystalovou strukturu skrze montáž báze zátěže. Krystal navíc operoval v rezonančním režimu, namísto tehdejšího standardního vychylovacího (deflection) režimu, čímž zvyšoval efektivitu přeměny energie. Když byl tento piezoměnič použit na srdci psa, produkoval při 80 BPM maximální napětí 4 V na $105\ \Omega$ zátěži, což dávalo výkon $160\ \mu\text{W}$.



Obr. 1 Diagram struktury piezoelektrického měniče: S=délka prohnutí, 15= obal měniče, 10=krystal ve formě vetknutého nosníku, 17= ukotvení krystalu, 18= závaží



Obr. 2 Obvod piezoelektrického měniče s násobičem napětí

F. Patent: Pacing lead with piezoelectric power generating means

Český název: Stimulační elektrody srdce s piezoelektrickým měničem pro generování energie

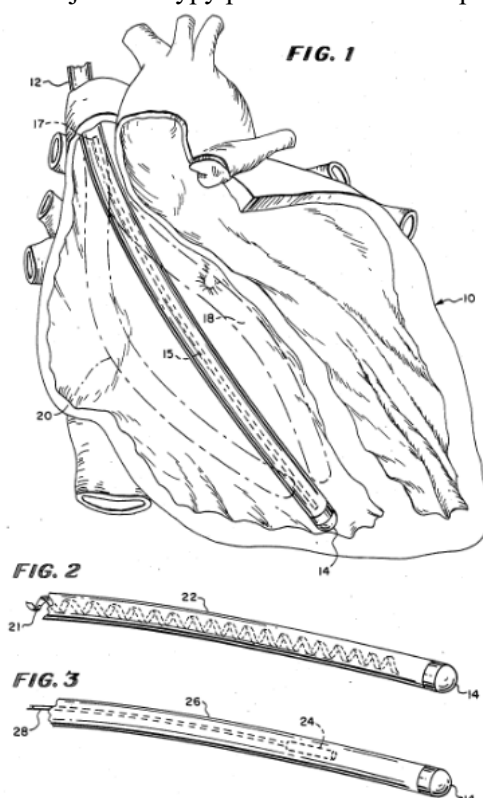
Zdrojová databáze: Google patenty

Bibliografický záznam: SCHROEPPPEL, Edward A. *Pacing lead with piezoelectric power generating means*. US. 4690143. Uděleno 1.9.1987.

Stručné shrnutí článku:

Dalším způsobem, který využívá pohyby lidského těla je právě tento patent. Schroeppele už v roce 1987 představil katétr s piezoelektrickým stripem, který byl zaveden do srdce člověka a měl napájet kardiostimulační elektrody. Pohyby srdce ohýbaly katétr a tím i piezoelektrický strip, čímž se generovala energie.

Piezoelektrický materiál mohl mít strukturu unimorfní, bimorfní, multimorfní. FIG 1, 2, 3 v následujícím obrázku reprezentují různé typy provedení katétru s piezoměničem.



Obr. 3 Umístění katétru s piezoměničem v srdci, 12= tělo katétru, 10=srdce, 14=elektroda v lumenu, 15=zařízení produkující elektrickou energii-piezoměnič, 20= linie ohnutí katétru, 21=spirálovitá cívka vícevrstvého piezofilmu, 22=tělo katétru, 24=bimorfní piezo struktura, 28=vodič,26= tělo katétru

G. A gait-powered autologous battery charging system for artificial organs

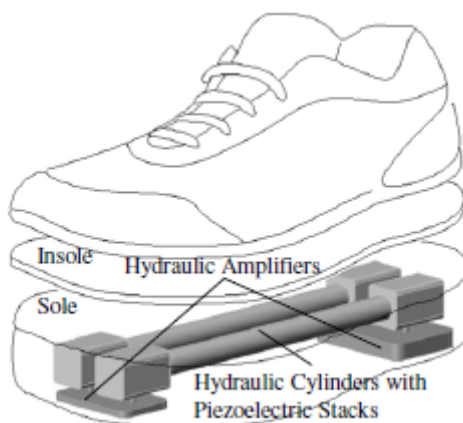
Český název: Autologní systém nabíjení baterie pro umělé orgány pomocí chůze

Zdrojová databáze: Pubmed

Bibliografický záznam: Antaki, J. F., Bertocci, G. E., Green, E. C., Nadeem, A., Rintoul, T., Kormos, R. L., & Griffith, B. P. (1995). A gait-powered autologous battery charging system for artificial organs. *ASAIO journal*, 41(3), M588-M595.

Stručné shrnutí článku:

Jedna z prvních metod generování energie pomocí piezoelektrické přeměny, kdy piezoelektrické měniče byly umístěny v botě. Metoda slouží k napájení umělých orgánů. Generátor se skládal z dvou hydraulických válců umístěných v podrážce boty, které aktivovaly k nim přidělané piezoelektrické vrstvy na konci těchto válců. Hydraulické pulzní zesilovače, které byly umístěny pod těmito válci v oblasti prstů a paty konvertovaly nízkofrekvenční krokové pulzace na pulsy s většími frekvencemi. Byl proveden set experimentů a byl vytvořen i prototyp v měřítku 1/17 k ověření této metody. Výsledný generovaný výkon při chůzi byl 150-675 mW a při běhu 675-2100 mW. Výsledný výkon na kilogram byl při chůzi $5.7 \pm 2.2 \text{ mW kg}^{-1}$ a $23.6 \pm 11.6 \text{ mW kg}^{-1}$. Celkově bylo v závěru odhadnuto, že maximálně lze z osoby vážící 75 kg získat výkon 6.2 W.



Obr. 4 Návrh hydraulických válců v podrážce boty pro získávání elektrické energie a jednotlivé části zařízení

H. Parasitic power harvesting in shoes

Český název: Získávání parazitní energie generované v botech při chůzi

Zdrojová databáze: IEEE

Bibliografický záznam: Kymissis, J., Kendall, C., Paradiso, J., & Gershenfeld, N. (1998, October). Parasitic power harvesting in shoes. In *Wearable Computers, 1998. Digest of Papers. Second International Symposium on* (pp. 132-139). IEEE.

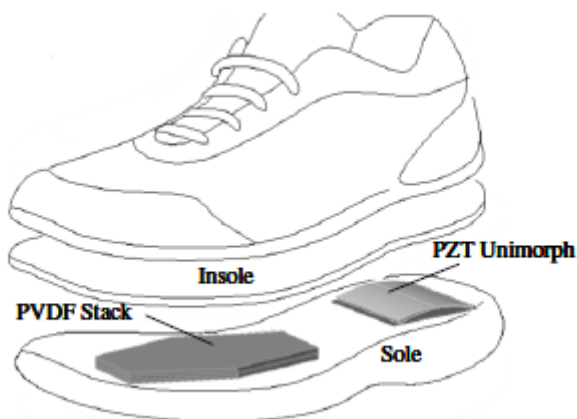
Stručné shrnutí článku:

Další metodou získávání energie z chůze měničem umístěným v botách představil Kymissis a spol. Představili koncept generace parazitní energie, kdy dojde k zachycení energie, která by normálně byla ztracena v okolním prostředí. Vytvořili dva rozdílné piezoelektrické návrhy speciální boty, a k tomu ještě jeden s elektromagnetickým měničem.

První model obsahoval vrstvu Polyvinylidenfluoridu (PVDF) v podobném tvaru jako je standardní podrážka boty, aby dobře registrovala ohýbání podrážky. V momentě, kde je PVDF vrstva ohnuta, vnější PVDF listy vrstvy jsou natáhnuty a vnitřní listy jsou stlačeny, což generuje napětí $\pm 60\text{V}$ a průměrný výkon $1,1\text{ mW}$.

Druhý model byl navrhnut tak, aby získával energii v momentě, kdy pata dopadne na zem. To bylo provedeno pomocí unimorfního stripu pružinové oceli připevněném na vrstvě piezoelektrického materiálu. Když pata dopadne, čímž zatlačí a ohne pružinu, piezoměnič je roztahován. Když je tlak následně povolen, vrátí se pružina do původního stavu. Získané napětí dosahuje až 150 V napětí a průměrný výkon se pohybuje kolem $1,8\text{ mW}$.

Třetí návrh představoval adaptaci elektromagnetického generátoru v botě a sloužil jako reference k dvěma piezoelektrickým modelům. Tento model dosahoval napětí až 3 V a produkoval výkon o hodnotě 230 mW , avšak na úkor zhoršené chůze.



Obr. 5 Návrh hydraulických válců v podrážce boty pro získávání elektrické energie pomocí jednotlivé části zařízení

Oba piezoelektrické modely boty byly testovány v jejich schopnosti napájet RFID vysílač umístěný na botě. Tyto generátory byly schopné vyslat 12 bitový sériový ID na frekvenci 310 MHz každé 3 kroky z 6 z celkové dráhy 20 ušlých metrů .

I. Scavenging energy from human body: design of a piezoelectric transducer

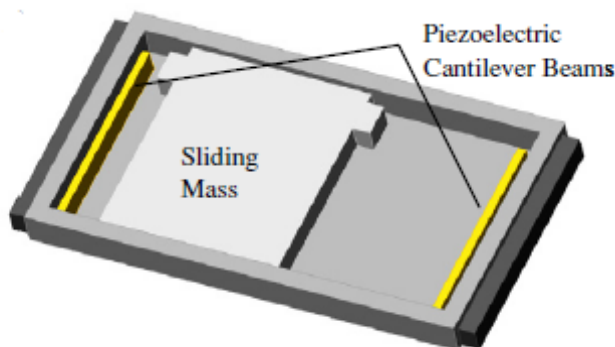
Český název: Získávání energie z lidského těla: návrh piezoelektrického měniče

Zdrojová databáze: IEEE

Bibliografický záznam: Renaud, M., Sterken, T., Fiorini, P., Puers, R., Baert, K., & Van Hoof, C. (2005, June). Scavenging energy from human body: design of a piezoelectric transducer. In *The 13th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems, 2005. Digest of Technical Papers. TRANSDUCERS'05.* (Vol. 1, pp. 784-787). IEEE.

Stručné shrnutí článku:

Tento návrh piezoelektrického měniče už se posouvá do doby, kdy začaly být navrhovány systémy založené na lineárně pohybující se části, která se trefuje do piezoelektrické struktury. Tento model funguje jako generátor elektrické energie z pohybu lidských končetin: Generátor obsahuje právě volně pohybující se část (750mg) umístěnou v rámu (12mm x10 mm). Dále jsou na koncích rámu umístěny piezoelektrické měniče (vetknuté nosníky), které se mohou nárazem pohnout až od 10 mm. Pokaždé co pohybující se část narazí do vetknutých nosníků, dochází k resonanci a generuje se výkon, který je v článku určen na 40 μW . Navazující práce této skupiny v roce 2009 vylepšila generovaný výkon podobného zařízení na 47 μW při vyotování každou sekundu.



Obr. 6 Návrh piezoměnič založeném na nárazech lineárně pohyblivé části

J. Energy harvesting using vibrating structures excited by shock

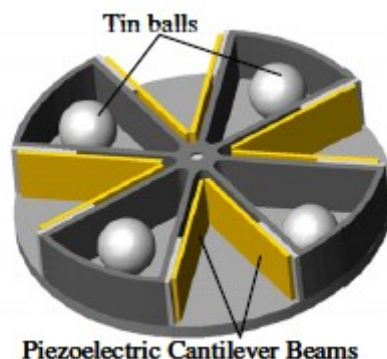
Český název: Získávání energie pomocí vibrujících struktur vybuzených šokem

Zdrojová databáze: IEEE

Bibliografický záznam: Cavallier, B., Berthelot, P., Nouria, H., Foltete, E., Hirsinger, L., & Ballandras, S. (2005, September). Energy harvesting using vibrating structures excited by shock. In *IEEE Ultrasonics Symposium* (Vol. 2, pp. 943-945).

Stručné shrnutí článku:

V roce 2005 představila tato skupina technologii harvesteru využívajícího odrazu cínových kuliček na piezoelektrických vetknutých nosnících uvnitř 14 mm kruhového pouzdra, které bylo 2 mm vysoké. Pouzdro obsahovalo 8 PZT vetknutých nosníků a čtyři 40 mg cínové kuličky. Přestože tato studie porovnávala efektivitu návrhu, demonstrovala i možnost použití malých frekvencí k rezonanci vysokofrekvenčních struktur. Tento přístup se tím pádem vyhýbá nutnému naladění rezonanční frekvence harvesteru s zdrojem vibrací. Po testování bylo zjištěno, že jeden element dokáže při frekvenci 6 Hz vyprodukovat výkon 62 nW, což po sečtení všech elementů pouzdra dává výkon zhruba 0,5 μ W.



Obr. 7 Návrh měniče využívajícího odrazu cínových kuliček na nosníky

K. The use of piezoelectric ceramics for electric power generation within orthopedic implants

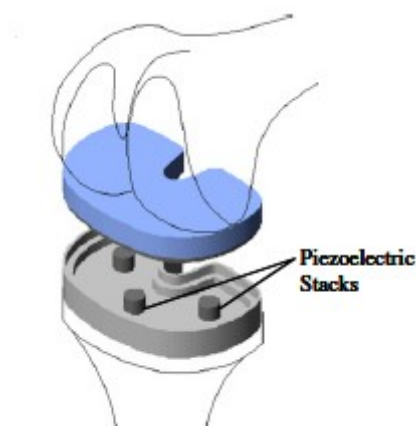
Český název: Použití piezoelektrického keramického materiálu v ortopedických implantátech pro jejich energetické napájení

Zdrojová databáze: IEEE

Bibliografický záznam: Platt, S. R., Farritor, S., Garvin, K., & Haider, H. (2005). The use of piezoelectric ceramics for electric power generation within orthopedic implants. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 10(4), 455-461.

Stručné shrnutí článku:

Tento piezoelektrický generátor je umístěn do vnitřní struktury kolenního implantátu (náhradního kolenního kloubu) a slouží k napájení ortopedických zařízení. Využívá toho, že koleno může být zatíženo silami 3 krát většími než je tělesná váha. Tři piezoelektrické vrstvy (1x1x2 cm) byly umístěny dovnitř prototypního modelu pro laboratorní testování. Při aplikaci síly 900 N na jednu piezoelektrickou vrstvu, byl vyprodukován výkon až 1.6 mW, tudíž tři vrstvy by daly 4,8 mW. Celý prototyp pak dokázal kontinuálně produkovat až 850 μ W a dokázal fungovat s celkovou elektrickou efektivitou 19% a elektromechanickou efektivitou 20 %.



Obr. 8 Piezoelektrický generátor náhradním kolením kloubu

L. Design considerations for an implantable, muscle powered piezoelectric system for generating electrical power

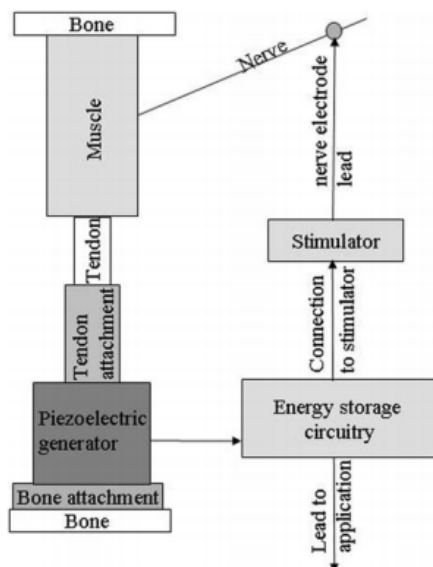
Český název: Návrh implantabilního svalově poháněného piezoelektrického systému pro generování elektrické energie

Zdrojová databáze: Springer

Bibliografický záznam: Lewandowski, B. E., Kilgore, K. L., & Gustafson, K. J. (2007). Design considerations for an implantable, muscle powered piezoelectric system for generating electrical power. *Annals of biomedical engineering*, 35(4), 631-641.

Stručné shrnutí článku:

Namísto toho, aby zařízení pasivně generovalo energii inerciální části, tak využívá svalové kontrakce jako vstupní energii pro piezoelektrickou vrstvu. Zařízení bylo navrženo tak, aby bylo umístěno sériově k svalové šlaše. Předpokládá se, že více energie lze získat ze svalu, který je vybuzen elektricky, než ze svalu, který je vybuzen přirozeně.



Obr. 9 principiální schéma funkce piezoměniče

Vědci se zaměřovali především na jedince s paralýzou, kdy elektricky stimulovaný sval neinterferuje s přirozenými kontrakcemi svalu nebo aktivitou. Celkově tři svaly byly vyzkoušeny pro implantaci měniče: sval vřetenní (naměřená síla 50N), široký sval zádový (naměřená síla 100N) a sval lýtkový (naměřená síla 250N). Výkon generovaný jednou vrstvou piezoměniče (5x5 mm, frekvence 1 Hz s 250 ms pulzy) byl 8 μ W na 2,5 cm délky u vřetenního, 54 μ W na 4 cm délky u zádového a 690 μ W na 8 cm délky u lýtkového. Experimentálně se ukázalo, že malá PZT vrstva o velikost 5x5x18 mm vygeneroval výkon 80 μ W, pokud byla vykonána síla o velikosti 250 N. Nicméně další použití třeba přímo na svaích (nejen na šlaše) a kostech je předmětem budoucího výzkumu.

M. Development of an electrostatic generator for a cardiac pacemaker that harnesses the ventricular wall motion

Český název: Návrh elektrostatického generátoru pro kardiostimulátoru získávajícího energie z pohybů srdečních komor

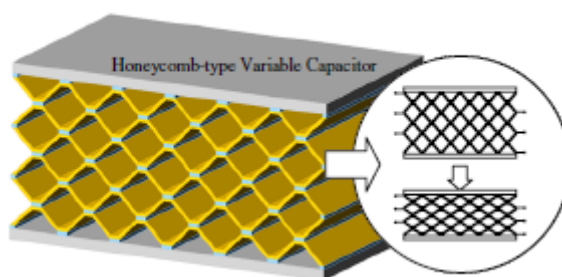
Zdrojová databáze: Springer

Bibliografický záznam: Tashiro, R., Kabei, N., Katayama, K., Tsuboi, E., & Tsuchiya, K. (2002). Development of an electrostatic generator for a cardiac pacemaker that harnesses the ventricular wall motion. *Journal of Artificial Organs*, 5(4), 0239-0245.

Stručné shrnutí článku:

V této studii byl navržen elektrostatický generátor energie s variabilní kapacitou pro získávání energie z pohybu stěny komory srdce. Generátor má strukturu medové plástve. Principiálně funguje měnič tak, že se desky mechanicky smrští (jsou méně separované) vlivem pohybu ventrikulární stěny, čímž snižují kapacitu a zvyšuje se napětí na kondenzátoru.

Malý prototyp, který rezonoval na frekvenci 6 Hz, byl umístěn do srdce psa, k testování schopnosti prototypu získávat energii ze stěny levé srdeční komory. Prototyp se skládal ze stripů vlnitého hliníku napařeného na polyesterový film (50mm x 30mm x 30 μ m). Tyto stripy byly naskládány do 50 řad s 20 buňkami na jednu vrstvu s celkovou hmotností 780 g. Bylo vykonáno testovací měření, kdy se na srdce psa přiložil akcelerometr, který budil generátor stejným pohybem, jaký vykonávalo srdce. Získaná energie byla použita pro stimulaci srdce psa o frekvenci 180 bpm na déle než dvě hodiny. Průměrný získaný výkon byl 36 μ W a spotřeba na stimulační puls byla 18 μ W.



Obr. 10 Elektrostatický generátor (měnič) ve tvaru medové plástve

N. MEMS electrostatic micropower generator for low frequency operation

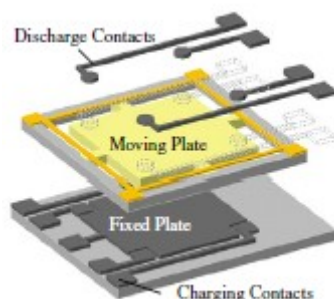
Český název: MEMS (mikro elektro mechanický systém) elektrostatický mikroenergetický generátor pro operace na nízkých frekvencích

Zdrojová databáze: Elsevier

Bibliografický záznam: Mitcheson, Paul D., et al. "MEMS electrostatic micropower generator for low frequency operation." *Sensors and Actuators A: Physical* 115.2 (2004): 523-529.

Stručné shrnutí článku:

Tato skupina vytvořila elektrostatický prototyp generátoru, který nerezonoval. Obsahoval kondenzátor s paralelními deskami, přičemž velikost mezery mezi nimi byla variabilní. Tento prototyp byl předem nabit na 30 V, přičemž generoval výstupní napětí 250 V při získané energii 0,3 μJ za jeden cyklus. Existovaly celkem tři návrhy provedení generátoru, zařízení mělo nakonec podobu „coulomb-force parametric-generator (CFPG)“, která je vhodná pro vysoké amplitudy a nízké frekvence. Tento generátor využívá kontaktní síly (inerciální síly) k utlumení pohybu kondenzátoru s paralelními deskami. Energie je generována v momentě, kdy je inerciální síla vyšší než tlumicí síla. Generátor obsahoval 200mm² velkou oblast kondenzátorových desek, přičemž pohybující se část byla zhotovena ze 3 silikonových plátů (10x11x0,4 mm). Tato deska se mohla dislokovat maximálně o 450 μm . Změna kapacity z 15 pF na 127 pF produkovala finálních 250 V na výstupu s parazitní kapacitou 11 pF.



Obr. 11 Návrh kondenzátorového energetického harvesteru (Miao, P. 2006)

Dalším pokrokem v oblasti nerezonujících kondenzátorových energetických harvesterů byla prezentována další skupinou okolo Mitchersona (Miao, P., Mitcheson, P. D., Holmes, A. S., Yeatman, E. M., Green, T. C., & Stark, B. H. (2006). MEMS inertial power generators for biomedical applications. *Microsystem Technologies*, 12(10-11), 1079-1083.) v roce 2006. Jejich návrh kondenzátoru s variabilní kapacitou generoval energii, když byly desky separovány díky inerciálním silám na hmotě, která byla připevněna k jedinému pohybujícímu se plátu. Až 120 nJ energie bylo získáno za jeden cyklus s výstupním napětím 220 V. Teoreticky bylo určeno, že zařízení pracující s frekvencí 30 Hz může vygenerovat výkon až 80 μW , nebo energii 2,6 μJ za jeden cyklus, pokud je použit křemík jako materiál aktivní části měniče. Bylo taky zmíněno, že pokud by bylo použito zlato jako materiál aktivní části měniče, byla by získaná energie desetinásobná.

O. Arrayed liquid rotor electret power generator systems

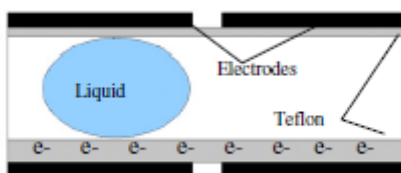
Český název: Systémy Elektretu kapalinového rotoru v poli pro generování energie

Zdrojová databáze: IEEE

Bibliografický záznam: Boland, J. S., Messenger, J. D. M., Lo, K. W., & Tai, Y. C. (2005, February). Arrayed liquid rotor electret power generator systems. In *18th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, 2005. MEMS 2005*. (pp. 618-621). IEEE.

Stručné shrnutí článku:

V tomto článku byl navrhnut speciální elektret s kapalinovým rotorem pro generování energie (LEPG). Zařízení se skládalo z upevněných elektretových kondenzátorů (s teflonovou vrstvou) a s vzdušným dielektrikem, které obsahovalo kapky kapaliny. Polární kapaliny jako třeba voda mají vysoké relativní dielektrické konstanty, což způsobí velký nárůst kapacity v momentě, kdy kapka nahradí vzduch mezi deskami kondenzátoru. Při vibrování zařízení se mohou kapky volně pohybovat, čímž mění kapacitu systému generujícího energii. Byl zmíněn zisk 0,11 μW na frekvenci 60 Hz, ale očekává se, že zařízení dokáže vygenerovat výkon až 10 μW .



Obr. 12 LEPG

P. Feasibility of using the automatic generating system for quartz watches as a leadless pacemaker power source

Český název: Možnost použití automatického generujícího systému qartz hodinek pro napájení kardiostimulátoru bez přívodních vodičů

Zdrojová databáze: Springer

Bibliografický záznam: Goto, H., Sugiura, T., Harada, Y., & Kazui, T. (1999). Feasibility of using the automatic generating system for quartz watches as a leadless pacemaker power source. *Medical & biological engineering & computing*, 37(3), 377-380.

Stručné shrnutí článku:

Tato studie se snažila ukázat, zda může být elektromagnetický mechanismus generování energie od firmy Seiko vyrábějící hodinky použit i na implantabilní biomedicínská zařízení. Automatický generující systém (AGS) od firmy Seiko, který je znám i pod názvem Kinetic brand, se skládá z oscilujícího závaží připojenému k permanentnímu magnetu přes rotační ozubené soukolí. Při pohybu zápěstí se produkuje pohyb rotace odstředivé části, a generátor produkuje výkon 5-10 μW při nošení nebo 1 mW při zatřesení.

Goto a spol. se právě snažili zkoumat proveditelnost použití tohoto mechanismu AGS od firmy Seiko (oscilující závaží, ozubené soukolí, generátor, jednocestný usměrňovač a kapacitor) k napájení zařízení, které stimulovalo psí srdce. Tento generátor byl umístěn na stěnu pravé komory a produkoval 80 mJ energie po usměrnění. Dále dokázal v kondenzátoru uložit náboj pro zajištění 30 minutové stimulace srdce psa při frekvenci 200 bpm. Tento nabitý kondenzátor byl použit i na stimulaci srdce psa o frekvenci 140bpm, přičemž spotřeboval 420 mJ energie za 60 min. Tato aplikace ukázala, že tato metody by pokryla energetickou spotřebu, jelikož dokázala vyprodukovat 13 μJ za jeden tluk srdce, přičemž předpokládaná energetická spotřeba pro srdeční stimulaci je pouze 5 μJ (2,5 V, 0,4ms a 500 Ω zátěž). Přestože byla proveditelnost potvrzena, žádné další stimulace srdce nebyly provedeny kvůli opravdovým energetickým nákladům (80 mJ vyprodukovaných proti 210 mJ potřebných na 30 min stimulace). Žádné dlouhodobé studie v tomto poli poté nebyly touto skupinou dále prezentovány.

Na jejich práci však navázala skupina kolem Gorge v roce 2001 (Gorge G, Kirstein M and Erbel R 2001 Microgenerators for energy autarkic pacemakers and defibrillators: fact or fiction?). Tato skupina připevnila AGS mechanismus firmy Seiko na hrudník osoby pracující v kanceláři. Za 8 hodin času nošení se vyprodukoval výkon, který se pohyboval v rozmezí 0,2 až 3,1 μW , přičemž průměrná hodnota byla 0,5 μW . Předpokládali, že energie vzniklá vygenerováním je 10 až 100 krát menší než opravdová energie nutná k nabití standardní baterie stimulátoru. Testovali taky jiný typ elektromagnetického generátoru než ten od firmy Seiko, ale ten nevykazoval lepší výsledky než systém od Seika.

Q. Electromagnetic generators for power harvesting

Český název: Elektromagnetické generátory (měniče) pro získávání energie

Zdrojová databáze: IEEE

Bibliografický záznam: Duffy, M., & Carroll, D. (2004, June). Electromagnetic generators for power harvesting. In *Power Electronics Specialists Conference, 2004. PESC 04. 2004 IEEE 35th Annual* (Vol. 3, pp. 2075-2081). IEEE.

Stručné shrnutí článku:

Lineárně vychylované generátory, které se velmi podobají komerčním svítidlům (baterkám) nabíjejícím se zatřesením, jsou jedny z nejvíc používaných generátorů pro získávání elektrické energie z kinetické energie.

Tito autoři umístili pohyblivý se elektromagnetický generátor do podrážky boty pro získávání energie z lidské chůze. Uspořádání generátoru se skládalo z dvou proti sobě položených magnetů a tří segmentové cívky (13 mm průměr, 45 mm délka cívky). Takový generátor by schopen vyprodukovat výkon až 8,5 mW při frekvenci 5 Hz.

Dále taky představili menší set tří generátorů, které používaly proti sobě orientované magnety. Jeden z těchto generátorů byl fixovaný a další dva byly pohyblivé v cívkách, přičemž všechny byly umístěny opět v podrážce boty. Takhle upravený set byl schopný generovat výkon až 230 μ W na frekvenci 5 Hz.

O rok později udělala dvojice další projekt, kdy ještě vylepšili svůj původní design (Carroll D and Duffy M 2005 Demonstration of wearable power generator) a zhodnotili přínos usměrňovacích obvodů. Jednocestný a dvojcestný usměrňovač byl porovnán s dvojnásobičem a čtyřnásobičem napětí, přičemž dvojnásobič byl schopný vygenerovat větší napětí a výstupní energii. V generátoru bylo 6 cívek s pohyblivými se magnety, a tento generátor při frekvenci 2 Hz vykazoval výstupní napětí 4 V peak to peak. Za ním byly implementovány násobiče a dvojnásobič vykazoval nejlepší výsledky, jelikož po znásobení napětí a usměrnění dodával dvojvrstvému kondenzátoru o kapacitě 0,1 F výkon skoro 1 mW. Nicméně se očekávalo, že se dosáhne výkonu až 2 mW, a tento neúspěch byl odůvodněn nízkou pracovní frekvencí, která způsobovala, že se kondenzátor pomalu nabíjel.



Obr. 13 Design elektromagnetického generátoru podle Duffyho a Carola

R. Generating electricity while walking with loads

Český název: Generování energie při chůzi se zátěží

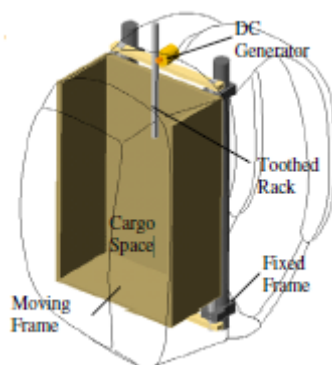
Zdrojová databáze: Science

Bibliografický záznam: Rome, L. C., Flynn, L., Goldman, E. M., & Yoo, T. D. (2005). Generating electricity while walking with loads. *Science*, 309(5741), 1725-1728.

Stručné shrnutí článku:

Tahle skupina vědců přišla s odlišnou metodou generování energie z pohybu. Vynalezli speciální batoh se zátěží, který generoval energii z pohybu zátěže nahoru a dolů, který vznikl při chůzi člověka s tímto batohem. Toto zařízení dávalo energii daleko vyšší než u ostatních kinetických měničů v rešerši, dávalo totiž výkon až 7,4 W, ale to pouze za cenu námahy nošení těžkých břemen (38 kg). Tahle nevýhoda byla prezentována jako řešení pro jedince, kteří už tak běžně nosí takové závaží s tím, že práce metabolismu je snížena. Je předpokládáno, že pokud se osoba průměrně pohne o 5 cm ve vertikální ose během chůze, tak zátěž v tomhle batohu se pohne o stejnou vzdálenost. Tudíž změnu polohy zátěže v batohu lze použít k získávání energie.

Batoh byl navržen následovně. Rám ve fixované pozici k tělu obsahoval volně pohybující se zátěž, která byla od fixovaného rámu oddělena pružinami a připevněna vertikálními tyčemi k rámu. Generátor se mohl otáčet až 5000 krát za minutu při vertikálním pohybu o 4,5 cm.



Obr. 14 Návrh elektromagnetického generátoru energie v podobě batohu

S. Design and performance of linear biomechanical energy conversion devices

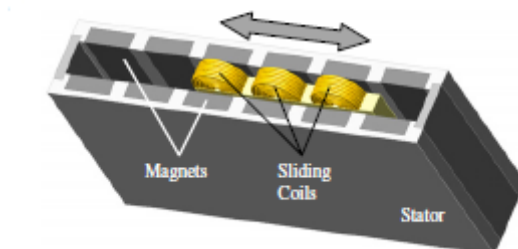
Český název: Návrh a testování zařízení konvertující lineární biomechanickou energii

Zdrojová databáze: IEEE

Bibliografický záznam: Niu, P., & Chapman, P. (2004). Design and performance of linear biomechanical energy conversion devices. In *2006 37th IEEE Power Electronics Specialists Conference*.

Stručné shrnutí článku:

Byly vyhodnoceny tři druhy lidského pohybu (pohyb ramena, pohyb chodidla a dislokace trupu) pro potenciální umístění energetických harvesterů na lidské tělo. Lineární elektromagnetický generátor byl umístěn na tyto tři lokace a bylo měřeno napětí a usměrněná energie pro nabíjení baterie. Pro harvester umístěný na rameni bylo naměřeno špičkové napětí 7 V a průměrný výkon 10 mW. Pro harvester umístěný v batohu (dislokace trupu) bylo naměřeno špičkové napětí 20 V a průměrný výkon 50-80 mW. Pro harvester umístěný na chodidle bylo naměřeno špičkové napětí 27 V a průměrný výkon 80 mW. Bylo zmíněno, že pokud by bylo použito impedanční sladění, zvětšila by se transferovaná energie 3x.



Obr. 15 Lineární elektromagnetický harvester od Niu a Chapmana 2006

T. Kinetic energy powered computing—an experimental feasibility study

Český název: Výpočetní technika napájena kinetickou energií- experimentální studie proveditelnosti

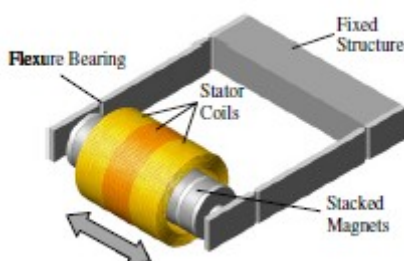
Zdrojová databáze: IEEE

Bibliografický záznam: Büren, T. V., Lukowicz, P., & Tröster, G. (2003, October). Kinetic energy powered computing—an experimental feasibility study. In *Proceedings of the 7th IEEE International Symposium on Wearable Computers* (p. 22). IEEE Computer Society.

Stručné shrnutí článku:

Tato skupina vyvinula elektromagnetický generátor a provedla jeho optimalizaci pro získávání energie při chůzi. Zařízení se skládalo z trubkovité struktury naplněné vzduchem s ohybovým ložiskem a několika magnety s cívkami. Magnety a cívky měly válcovité uspořádání – magnety byly vedle sebe a kolem nich byly navinuty závity cívky statoru. Optimalizované harvestery, které měly mezi 6-9 magnety a 6-10 statorovými cívkami byly analyzovány s generátorovým objemem $0,25 \text{ cm}^3$. Získaný výkon se lišil podle místa, kde byl generátor umístěn, nicméně průměrně to bylo $2\text{--}25 \mu\text{W}$. Autoři zmínili srovnání s lithium-iontovou baterií s objemem $0,25 \text{ cm}^3$, kdy energetická hustota $0,3 \text{ Wh cm}^{-3}$ by byla vyčerpána za periodu 4 let, pokud by se čerpalo $2 \mu\text{W}$. Nebo také by byla vyčerpána za 4 měsíce, pokud by se čerpalo $25 \mu\text{W}$.

Prototyp s objemem $0,5 \text{ cm}^3$ skládající se z 6 magnetů a 5 cívek, s délkou 15 mm a průměrem 6 mm byl zrealizován k potvrzení výsledků. Když byl tento prototyp umístěn pod kolenem, tak byl při chůzi schopný generovat špičkový výkon 1 mW, přičemž průměrně produkoval $35 \mu\text{W}$ s elektrickou efektivitou 66% při 10Ω zátěži.



Obr. 16 Design elektromagnetického generátoru

U. Biomechanical energy harvesting: apparatus and method

Český název: Získávání biomechanické energie: aparát a metoda

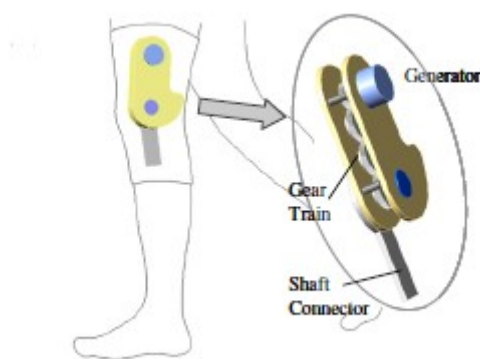
Zdrojová databáze: IEEE

Bibliografický záznam: Li, Q., Naing, V., Hoffer, J. A., Weber, D. J., Kuo, A. D., & Donelan, J. M. (2008, May). Biomechanical energy harvesting: Apparatus and method. In *Robotics and Automation, 2008. ICRA 2008. IEEE International Conference on* (pp. 3672-3677). IEEE.

Stručné shrnutí článku:

Tato skupina představila harvester umístěný u kolena získávající energii z biomechanické energie vznikající při chůzi. Kolenní ortéza byla modifikována tak, že obsahovala ozubené soukolí s malým trvalým magnetem a cívkou. Generátor byl navržen tak, aby získával energii ze zpomalení nohy podobně jako při regenerativním brzdění u hybridních automobilů (namísto získávání energie kontinuálně během chůze). Chůze se obecně skládá z dvou částí: aktivní při kroku a pasivní při stání. Při aktivní fázi při kroku dojde ke zpomalení nohy při dopadu nohy na zem (na konci kroku). Pokud ve správnou chvíli využijeme vznikající brzdění v kolenním kloubu, získáme výkon špičkově až 20 W, přičemž průměrná hodnota výkonu je $4,8 \pm 0,8$ W.

Metabolická energie pro brzdění kolena byla stanovena jako méně než 1 W, přičemž tato energie dokázala vyprodukovat 1 W energie elektrické. Naproti tomu metabolická energie 2 W je potřeba pro zajištění 1 W energie elektrické při kontinuálním režimu generátoru.



Obr. 17 Elektromagnetický harvester biomechanické energie připevněný na koleno

V. Body motion for powering biomedical device

Český název: Využití pohybu těla pro napájení biomedicínského zařízení

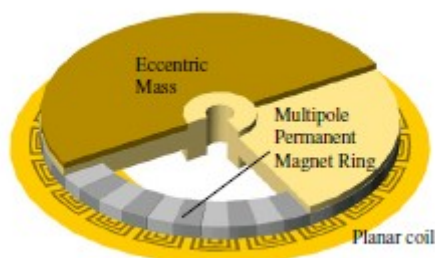
Zdrojová databáze: IEEE

Bibliografický záznam: Romero, E., Warrington, R. O., & Neuman, M. R. (2009, September). Body motion for powering biomedical devices. In *2009 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society* (pp. 2752-2755). IEEE.

Stručné shrnutí článku:

Jedná se o prototyp využívající rotační energii generovanou z pohybů lidského těla. Generátor se skládal z odstředivé zátěže, která byla připevněna k multipolárnímu trvalému magnetu (PM) kruhového rotoru, dále z planární cívky ve tvaru ozubeného kola a ložiskového uspořádání. Produkoval energii pomocí elektromagnetické indukce při rotaci odstředivé zátěže (v závislosti na lidském pohybu).

Byl vytvořen prototyp o objemu $1,5 \text{ cm}^3$ a hmotnosti 2,2 g. Tento prototyp měl 20 diskretních pólů trvalého magnetu z NdFeB ($5.1 \text{ mm} \times 1.1 \text{ mm} \times 1.1 \text{ mm}$). Ty byly umístěny do 25 mm do disku s odstředivou zátěží z mosazi. Maximální vygenerovaný výkon byl $3,5 \mu\text{W}$ na frekvenci 2,8 Hz na testovacím laboratorním vibrátoru. Na kolenu byl vyprodukovaný výkon dokonce $3,9 \mu\text{W}$. Navíc bylo odhadnuto, že se energie vygenerovaná zdesetinásobí u prototypů s vyšším počtem vrstev cívky.



Obr. 18 Návrh rotačního elektromagnetického generátoru energie

W. Energy Harvesting Strategy Using Piezoelectric Element Driven by Vibration Method

Český název: Technika získávání energie z prostředí při použití piezoelektrického měniče řízeného vibrační metodou

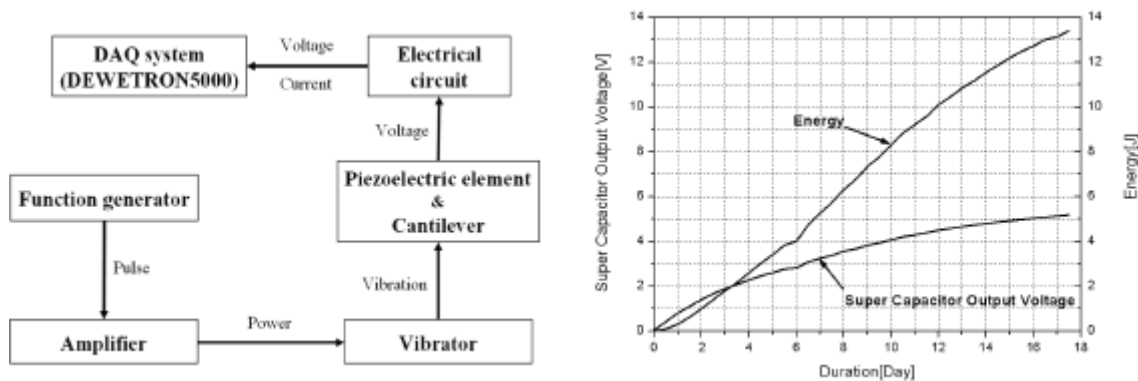
Zdrojová databáze: Scientific research

Bibliografický záznam: KIM, Dong-Gun, et al. Energy harvesting strategy using piezoelectric element driven by vibration method. Wireless Sensor Network, 2010, 2.02: 100.

Stručné shrnutí článku:

Tato práce demonstruje metodu pro získání energie z prostředí pomocí piezoelektrického měniče, který jako aktuátor využívá kinetické energie ve formě vibrací. Vibrace působící na měnič jsou ovládány pomocí elektrodynamického vibrátoru, který je řízen sinusovým průběhem z funkčního generátoru. Sinusový průběh z tohoto funkčního generátoru je navíc zesílen.

V práci bylo hodnoceno získané napětí a proud v závislosti na rezonanční frekvenci měniče, podle které byl přizpůsobena i frekvence vibrátoru. Resonanční frekvence piezoměniče musí být co nejnižší, jelikož frekvence zdrojů vibrací v prostředí (lidské tělo, proud větru, otřesy budov) je v drtivé většině nízká (do stovek Hz). Byly použity frekvence motoru v rozmezí 40-172 rpm.



Obr. 19 Blokový diagram měření a získaná energie v řádu dnů

V práci byl vyhodnocen i vliv dodatečného filtru usměrněného napětí z piezoměniče, který vyhlazoval průběh napětí před uložením energie na superkapacitor 1 F. Ukázalo se, že tento vyhlazovací kondenzátor zvyšuje účinnost a efektivitu získávání energie. Měření trvalo v řádu dnů, kdy byl piezoelektrický měnič neustále buzen vibrátorem. Po třech dnech byla získána energie téměř 2 J uložená na superkapacitoru.

X. PCB INTEGRATED MICRO-GENERATOR FOR WIRELESS SYSTEMS

Český název: Mikro generátor integrovaný na desce plošných spojů pro napájení bezdrátových senzorů

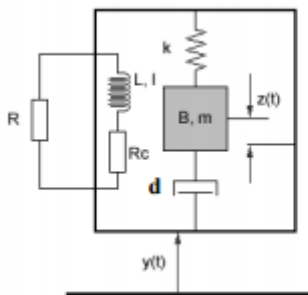
Zdrojová databáze: Intl. Symp. on Smart Structures and Microsystems

Bibliografický záznam: CHING, Neil NH, et al. PCB integrated micro-generator for wireless systems. In: *Intl. Symp. on Smart Structures and Microsystems*. 2000. p. 19-21.

Stručné shrnutí článku:

Tato práce prezentovala vývoj desky tištěných spojů, na které se nacházel generátor energie z vibrací (kinetické energie). Jednalo se o elektromagnetický měnič energie. Ten se skládal z mnoha velmi malých pružin vyrobených laserem o celkovém objemu 1 cm^3 , které se vibracemi rozpohybovaly. Cílem této práce bylo navrhnout takový koncept, který by byl schopný napájet obvod nebo bezdrátový senzor ve chvíli, kdy je přítomna kinetická energie v podobě vibrací. Byl určen pro využití na člověku, konkrétně v mobilních telefonech nebo na kardiostimulátorech.

Systém byl typu MEMS, to znamená systém v rozměrech mikrometrů. Princip elektromagnetického měniče spočíval v principu elektromagnetické indukce. Závaží v podobě magnetu bylo umístěno na pružině s určitou tuhostí uprostřed cívky. Když došlo k vibracím, magnet se pohnul o určitou vzdálenost, čímž změnil magnetický tok v poli a na blízké cívkce se tak indukovalo napětí.



Obr. 20 Princip použitého elektromagnetického generátoru

Prototyp byl schopný vygenerovat výkon $5 \mu\text{W}$ při napětí špička-špička, 245 mV výkonu při (při střídavém napětí) budící frekvenci vibrací 104 Hz a amplitudě vibrací $190 \mu\text{m}$.

Y. Vibration-to-Electric Energy Conversion

Český název: Konverze vibrační energie na elektrickou energii

Zdrojová databáze: IEEE

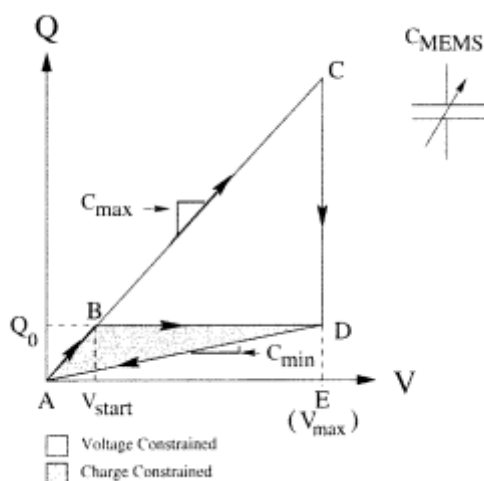
Bibliografický záznam: MENINGER, Scott, et al. Vibration-to-electric energy conversion. *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*, 2001, 9.1: 64-76.

Stručné shrnutí článku:

V této práci je navržen mikroelektronický systém, který konvertuje okolní mechanickou vibrační energii v elektrickou energii. Toho se využívá pro napájení autonomních elektronických systémů. Energie je přeměněna pomocí kapacitoru, jedná se tedy o elektrostatickou konverzi. Pokud přiložíme náboj na desky kondenzátoru a poté desky oddálíme, mechanická energie použitá k oddálení desek může být přeměněna na elektrickou.

V práci je používán variabilní kondenzátor, který může mít podobu klasického paralelního deskového kondenzátoru, nebo hřebenového kondenzátoru (deskového s hřebenovou strukturou). To dává dva možné styly konverze, jelikož deskový kondenzátor pracuje s konstantním nábojem a hřebenový kondenzátor s konstantním napětím.

To poté dává dva druhy konverzních cyklů podle obrázku níže – při konstantním náboji, kdy cyklus přechází cestu A-B-D-A, a při konstantním napětí kdy cyklus přechází cestu A-C-D-A. Plocha ohraničená těmito body představuje získatelnou energii při každém cyklu.



Obr. 21 Princip použitého elektromagnetického generátoru

Z obrázku je jasné že energie dostupná z cyklu s konstantním napětím je větší, nicméně kondenzátor se musí nabít na větší napětí. Celkově bylo možno získat z návrhu energii odpovídající výkonu $8,6 \mu\text{W}$ při jednom oddálení desek.

Z. Porovnání technologií kinetických měničů a závěr rešerše

V této rešeršní práci bylo popsáno celkem 21 různých návrhů a realizací zařízení získávajících energii z prostředí pomocí kinetického měniče energie. V každém prototypu byl uveden typ kinetického měniče (zda byl elektromagnetický, piezoelektrický či elektrostatický), jeho funkce a získaná energie či výkon.

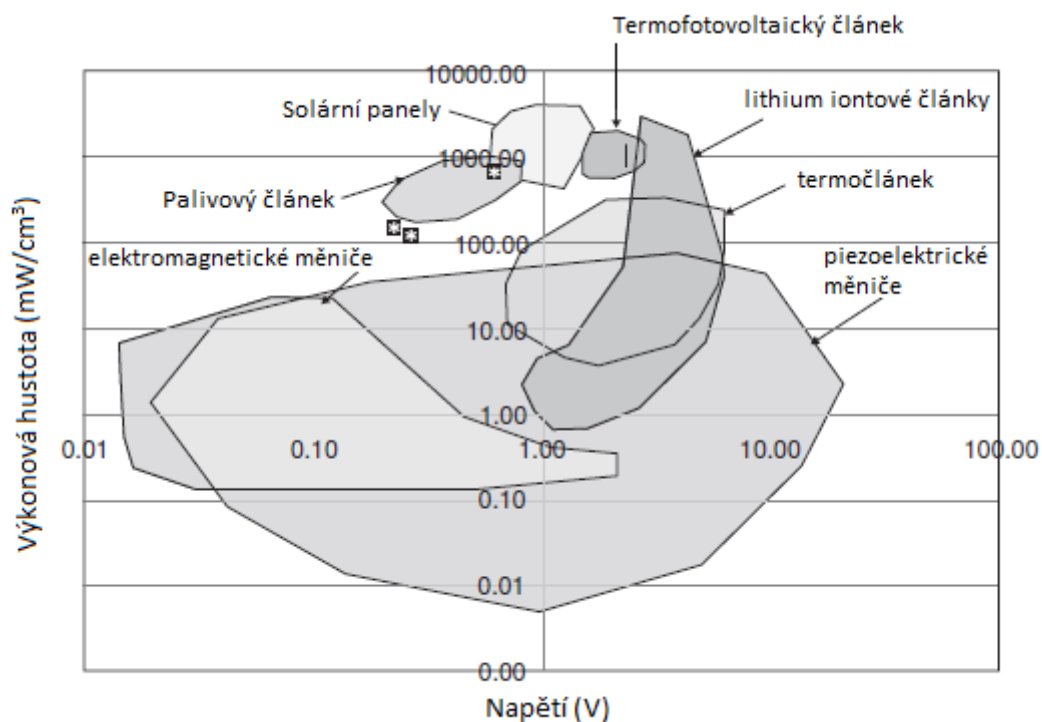
Přestože frekvence pohybů lidského těla má široké spektrum (a ne stálou frekvenci), ukázalo se, že je možno získat z lidského těla energetickou hustotu 1 mW cm^{-3} . Energie, kterou lze získat, je přímo úměrná velikosti aktivní vrstvy, která zajišťuje konverzi energie. Pokud budeme tedy zmenšovat velikost zařízení získávající energii z pohybu či vibrací, snížíme tím i získanou energii.[1]

Obecně nelze usoudit, která z metod konverze kinetické energie na elektrickou je jednoznačně nejlepší. Každé konkrétní použití kinetického měniče je totiž závislé na pravidelnosti a velikosti kinetické energie, kterou kinetický měnič zpracovává.

Některé významné výhody a nevýhody těchto technologií energetických měničů jsou shrnuty v následující tabulce:

Mechanismus	Hlavní výhoda	Hlavní nevýhoda
Piezoelektrický	Není nutný žádný externí zdroj el. napětí	Složitost integrace do mikro systémů
Elektrostatický	Snadno integrovatelný do mikro systémů	Nutnost přivedení dodatečného externího zdroje el.napětí
Elektromagnetický	Není nutný žádný externí zdroj el. napětí	Složitost optimální operace při zmenšení návrhu

Jak vyplývá z obrázku níže získané napětí či výkonová hustota elektromagnetických měničů je daleko menší než u piezoměničů, přičemž často jsou nutné další úpravy napětí tak, aby dosáhlo požadované amplitudy. Pro fungování elektrostatických měničů je zase nutné přivést externí napětí nebo náboj k tomu, aby relativní vibrační pohyb částic kapacitoru vytvořil střídavé elektrické napětí. U piezoměniče však pracujeme jednak s dostatečným napětím, které získáváme přímo z piezoelektrického materiálu, a navíc není nutné přivádět žádné externí napětí jako u elektrostatických. [2][3]



Obr. 22 Výkonové hustoty technologií získávající energii z prostředí a bateriových zdrojů v závislosti na napětí[3]

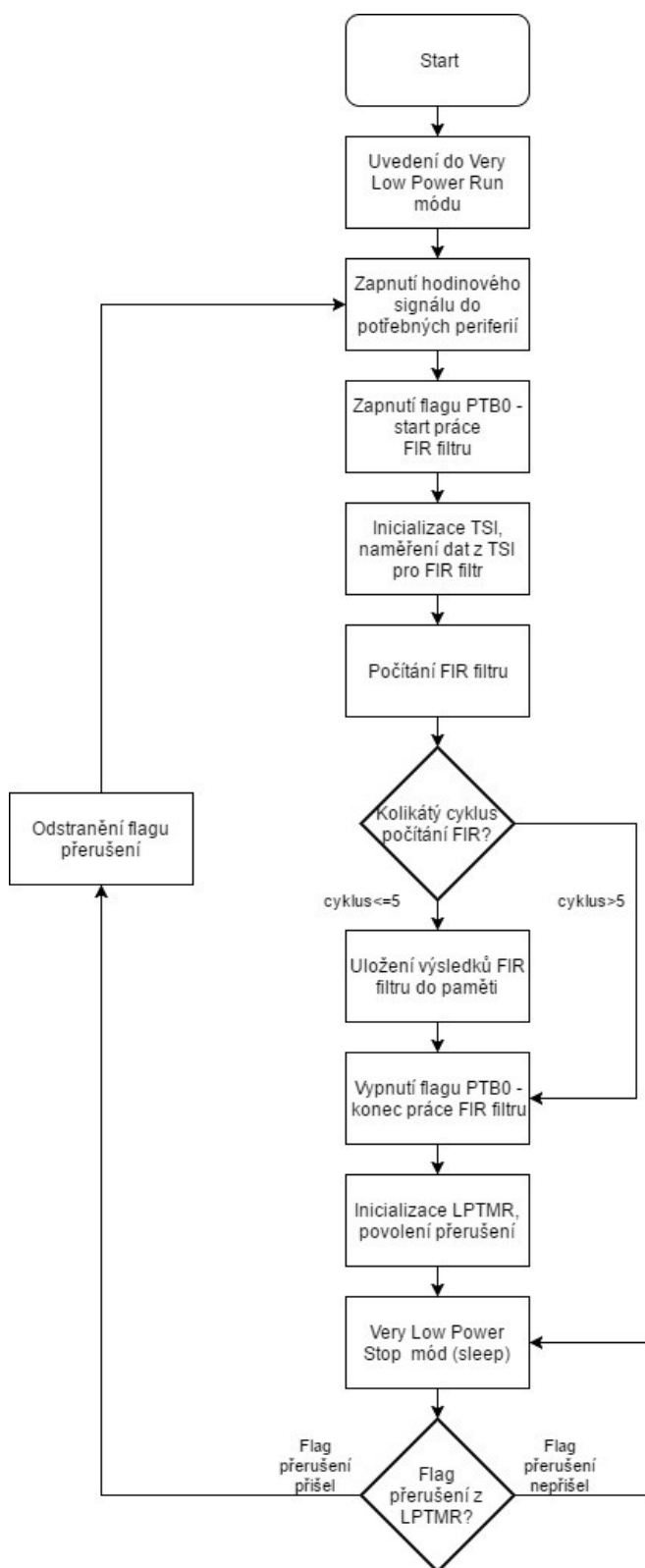
Biomedicínské snímače by tedy prozatím mohly těžit hlavně z hybridního systému (baterie a harvester) získávání energie a to hlavně v případech kdy přísun kinetické energie z prostředí není stálý. Energie nasbíraná ve chvílích, kdy je zdroj energie z prostředí aktivní může být nashromážděna a uložena. Implantabilní systémy se zdrojem energie v podobě kinetického harvesteru bez možnosti uložení energie např. do superkapacitoru by tudíž měly být použity pouze na orgánech s nepřetržitým pohybem (např. na srdci). Harvestery energie umístěné v botě jsou častou aplikací a potvrdily, že je možno pomocí nich vygenerovat velké množství energie. Nicméně jejich použití se zdá nepraktické kvůli velké vzdálenosti k zařízení, které napájí – tyto zařízení bývají často na jiných částech těla, než je noha.

Ukazuje se jistý potenciál uplatnění energetických harvesterů jako zdrojů energie pro aplikace (senzory atd.) na úrovni mikro elektroniky. Nicméně tahle technologie stále ještě čelí mnoha problémům zejména v limitech generované energie a velikosti, uchovávání energie atd. Do budoucna je však možné a pravděpodobné, že se technologie získávající energii z prostředí (pohybu) běžně uplatní nejen v komerčních, ale i v biomedicínských aplikacích.

AA. Dodatečné reference řešení

- [1] ROMERO, Edwar. *Powering biomedical devices*. ISBN 01-240-7783-8.
- [2] KOMPIS, Costis; ALIWELL, Simon. Energy harvesting technologies to enable remote and wireless sensing. *Sensors and Instrumentation-Knowledge Transfer Network*, 2008.
- [3] ERTURK, Alper; INMAN, Daniel J. *Piezoelectric energy harvesting*. John Wiley & Sons, 2011.

Příloha II Schéma implementovaného programového cyklu mikrokontroléru KL25



Příloha III Blokové schéma postupu měření



Příloha IV CD

- Kinetis SDK 2.0 projekt s kódem veškerých instrukcí pro softwarové nastavení a implementaci programu
- m. soubory pro zpracování naměřených průběhů měření, mat. soubory naměřených průběhů napětí a proudu